



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

Master en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura

**ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL ARROYO
QUIJORNA MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO**

Angela Rocio Español Mariño

arespanolm@usal.es

Tutor

Profesora Dra. Inmaculada Picón Cabrera

Ávila, 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme desarrollar el presente trabajo.

A mis padres Carlos Español, Jacqueline Mariño, hermanos Laura Español y Carlos Español, tía Rosalba Español y demás familiares por su apoyo y amor incondicional.

A mi tutora Inmaculada Picón y al profesor Dr. José Martínez, por la oportunidad de realizar este trabajo, por la colaboración y el acompañamiento durante mi estancia en Ávila.

A todo el cuerpo docente de la Universidad de Salamanca del Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura.

A mis amigos, Maciej, Fredy, Diana y Paula por sus consejos y compañía durante mis estudios del máster.

A las instituciones prestadoras de datos, como el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Instituto Geográfico Nacional (IGN), el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) y el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

A todas aquellas personas, que de una y de otra forma estuvieron conmigo durante esta jornada, un grande agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| GLOSARIO | 1 |
| RESUMEN | 2 |
| ABSTRACT | 3 |
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| 1. OBJETIVOS | 6 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 6 |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 6 |
| 2. MARCO TEORICO..... | 7 |
| 2.1 El riesgo | 7 |
| 2.2 Movimientos en masa | 8 |
| 2.2.1 Clasificación de los movimientos de ladera | 8 |
| 2.2.2 Factores condicionantes y desencadenantes..... | 10 |
| 2.3 Los movimientos de ladera en España..... | 10 |
| 2.4 Sistemas de Información Geográfica | 12 |
| 2.4.1 ArcGis | 12 |
| 2.4.2 Aplicaciones Web Map..... | 13 |
| 2.5 Metodologías de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos..... | 15 |
| 2.5.1 Análisis Multicriterio | 15 |
| 2.5.1.1 Variables de la evaluación multicriterio..... | 19 |
| 2.6 Detonante por precipitaciones | 23 |
| 2.7 Índices morfométricos para la caracterización de la cuenca | 27 |
| 3. ZONA DE ESTUDIO..... | 29 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 30 |
| 4.1 Revisión de información bibliográfica | 31 |
| 4.2 Captura de datos | 32 |
| 4.3 Delimitación de la subcuenca y análisis de parámetros morfométricos | 34 |
| 4.4 Determinación de los factores condicionantes..... | 39 |
| 4.4.1 Pendiente | 39 |
| 4.4.2 Litología | 40 |

| | |
|---|----|
| 4.4.3 Estructuras lineales | 44 |
| 4.4.3 Usos del suelo..... | 45 |
| 4.4.4 Cursos de agua | 47 |
| 4.4.5 Determinación de la susceptibilidad | 49 |
| 4.4.6 Análisis de las precipitaciones..... | 54 |
| CONCLUSIONES | 61 |
| REFERENCIAS..... | 63 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Principales factores causantes de desprendimientos ocurridos en España..... | 11 |
| Tabla 2 Escala de Saaty..... | 16 |
| Tabla 3 Índice de consistencia aleatoria | 18 |
| Tabla 4 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento | 19 |
| Tabla 5 Valoración de la susceptibilidad litológica | 20 |
| Tabla 6 Umbral de pendiente..... | 20 |
| Tabla 7 Clasificación de los valores de las lluvias máximas de una duración del día con un período de retorno de 100 años..... | 24 |
| Tabla 8 Resumen parámetros morfométricos de la subcuenca Arroyo de Quijorna | 35 |
| Tabla 9 Clasificación de área propuesta para las cuencas | 36 |
| Tabla 10 Razón de bifurcación de la Subcuenca Arroyo de Quijorna | 36 |
| Tabla 11 Valores interpretativos de la red de drenaje..... | 37 |
| Tabla 12 Valores para relieve o topografía del terreno | 38 |
| Tabla 13 índice de Gravelius | 38 |
| Tabla 14 Área de susceptibilidad de pendientes | 40 |
| Tabla 15 Área de los tipos de suelo en la subcuenca..... | 42 |
| Tabla 16 Área de la susceptibilidad litológica de la subcuenca | 44 |
| Tabla 17 Áreas de influencia de susceptibilidad de las estructuras..... | 45 |
| Tabla 18 Área de los usos del suelo en la subcuenca..... | 46 |
| Tabla 19 Área de susceptibilidad de la capa usos del suelo..... | 47 |
| Tabla 20 Área de influencia de la capa de red de drenaje | 49 |
| Tabla 21 Matriz entre pares de los factores condicionantes | 50 |
| Tabla 22 Matriz normalizada de criterios..... | 50 |
| Tabla 23 Razón de consistencia..... | 50 |
| Tabla 24 Susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca..... | 53 |
| Tabla 25 Estaciones meteorológicas próximas a la subcuenca..... | 55 |
| Tabla 26 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación el Retiro..... | 55 |
| Tabla 27 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación cuatro vientos | 55 |
| Tabla 28 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación colmenar viejo | 56 |
| Tabla 29 Calidad del ajuste del registro de precipitaciones..... | 56 |
| Tabla 30 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación el retiro | 56 |
| Tabla 31 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación cuatro vientos 57 | |

| | |
|---|----|
| Tabla 32 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación colmenar viejo | 58 |
| Tabla 33 Área entre Isoyetas..... | 61 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Esquema de las relaciones entre conceptos relacionados al riesgo. | 7 |
| Figura 2 Estructura básica de una página HTML | 14 |
| Figura 3 Matriz de comparaciones pareadas | 17 |
| Figura 4 Matriz de comparaciones pareadas. | 17 |
| Figura 5 Ejemplo ponderación de dos capas ráster) | 18 |
| Figura 6 Fallas de la península Ibérica..... | 23 |
| Figura 7 Mapa de Índice de torrencialidad. | 27 |
| Figura 9 Zona de estudio en la comunidad de Madrid | 30 |
| Figura 10 Municipios pertenecientes a la subcuenca | 30 |
| Figura 11 Metodología de estudio | 33 |
| Figura 12 Delimitación y caracterización de la cuenca | 34 |
| Figura 13 Subcuenca Arroyo de Quijorna | 35 |
| Figura 14 Jerarquía de red Strahler subcuenca arroyo de Quijorna | 37 |
| Figura 15 Pendientes subcuenca..... | 39 |
| Figura 16 Pendientes reclasificadas de la subcuenca | 40 |
| Figura 17 Litología Subcuenca..... | 42 |
| Figura 18 Litología reclasificada de la subcuenca | 43 |
| Figura 19 Estructuras tectónicas de la subcuenca | 44 |
| Figura 20 Distancia a estructuras tectónicas en la subcuenca..... | 45 |
| Figura 21 Usos del suelo en la subcuenca..... | 46 |
| Figura 22 Usos del suelo reclasificados de la Subcuenca | 47 |
| Figura 23 Red de drenaje de la subcuenca | 48 |
| Figura 24 Influencia de la red de drenaje..... | 49 |
| Figura 25 Proceso de Superposición ponderada..... | 52 |
| Figura 26 Susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca | 53 |
| Figura 27 Visor web de resultados..... | 54 |
| Figura 28 Método de la ponderación..... | 60 |
| Figura 29 Lluvias máximas en 24 horas con período de retorno de 100 años en la subcuenca | 60 |
| Figura 30. Esquema 1 del Modelo 1..... | 88 |
| Figura 31. Esquema 2 del Modelo 1..... | 89 |
| Figura 32. Esquema 3 del Modelo 1..... | 89 |
| Figura 33. Esquema 4 del Modelo 1..... | 90 |
| Figura 34. Esquema 5 del Modelo 1..... | 90 |
| Figura 35. Esquema 6 del Modelo 1..... | 90 |
| Figura 36. Esquema 7 del Modelo 1..... | 91 |
| Figura 37. Esquema 8 del Modelo 1..... | 91 |
| Figura 38. Esquema 9 del Modelo 1..... | 91 |
| Figura 39. Esquema 1 del modelo 2 | 93 |
| Figura 40. Esquema 2 del modelo 2 | 94 |

| | |
|---|----|
| Figura 41. Esquema 3 del modelo 2 | 94 |
| Figura 42 Esquema 4 del Modelo 2 | 94 |
| Figura 43 Esquema 5 del Modelo 2 | 95 |
| Figura 44 Esquema 6 del Modelo 2 | 95 |
| Figura 45 Esquema 7 del Modelo 2 | 95 |
| Figura 46 Esquema 8 del Modelo 2 | 96 |
| Figura 47 Esquema 9 del Modelo 2 | 96 |
| Figura 48 Esquema 10 del Modelo 2 | 96 |
| Figura 49 Esquema del Modelo 3 | 98 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 Porcentaje área de susceptibilidad de pendientes | 40 |
| Gráfico 2 Porcentaje del área de los tipos de suelo en la subcuenca | 43 |
| Gráfico 3 Porcentaje área de susceptibilidad de la litología | 44 |
| Gráfico 4 Porcentaje del área de influencia de susceptibilidad de las estructuras | 45 |
| Gráfico 5 Porcentaje área de usos del suelo en la subcuenca | 46 |
| Gráfico 6 Porcentaje del área de susceptibilidad de usos del suelo | 47 |
| Gráfico 7 Porcentaje área de influencia de la red de drenaje | 49 |
| Gráfico 8 Curva Intensidad duración, estación el retiro | 57 |
| Gráfico 9 Curva Intensidad duración, estación el retiro | 58 |
| Gráfico 10 Curva Intensidad duración, estación colmenar viejo | 58 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1 Mapa subcuenca Arroyo de Quijorna | 73 |
| Anexo 2 Mapa Red de drenaje. Subcuenca Arroyo de Quijorna | 74 |
| Anexo 3 Mapa jerarquía de red Strahler | 75 |
| Anexo 4 Mapa de Pendientes, subcuenca Arroyo de Quijorna | 76 |
| Anexo 5 Mapa de pendientes reclasificado Subcuenca Arroyo de Quijorna | 77 |
| Anexo 6 Mapa litológico, subcuenca Arroyo de Quijorna | 78 |
| Anexo 7 Mapa litológico reclasificado, subcuenca Arroyo de Quijorna | 79 |
| Anexo 8 Mapa estructuras tectónicas, subcuenca Arroyo de Quijorna | 80 |
| Anexo 9 Mapa estructuras tectónicas reclasificado | 81 |
| Anexo 10 Mapa usos del suelo, subcuenca Arroyo de Quijorna | 82 |
| Anexo 11 Mapa usos del suelo reclasificado, subcuenca Arroyo de Quijorna | 83 |
| Anexo 12 Mapa distancia a la red de drenaje, subcuenca Arroyo de Quijorna | 84 |
| Anexo 13 Mapa Susceptibilidad a movimientos en masa, subcuenca Arroyo de Quijorna | 85 |
| Anexo 14 Mapa de lluvias máximas en 24 horas con período de retorno de 100 años | 86 |
| Anexo 15. Modelo 1 | 87 |
| Anexo 16 Modelo 2 | 92 |
| Anexo 17 Modelo 3 | 97 |
| Anexo 18 Código HTML del visor web | 99 |

GLOSARIO

Movimientos en masa: Se refieren intrínsecamente a procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca, o ambas, en diversas proporciones, generadas por una serie de factores. Corresponden a procesos gravitacionales, en los que una porción del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior a la original. (Araya, 2002)

Riesgo: Se obtiene al relacionar la peligrosidad o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (García M. , 2009)

Susceptibilidad: Indica la predisposición del terreno a la ocurrencia o no del fenómeno. (Moral, 2014), y está condicionada por las características del terreno (topografía, geología) y por su localización geográfica (meteorología, climatología) (Rodríguez, García, & Menéndez, 2016)

Vulnerabilidad: Predisposición que tiene un elemento u objeto a ser afectado (Navarro, 2012) en función de parámetros sociales, tales como la densidad de población, diseño urbanístico, calidad y resistencia de las construcciones humanas, entre otras. (Rodríguez, García, & Menéndez, 2016)

Peligrosidad o amenaza: Probabilidad de ocurrencia del fenómeno dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica. Implica, por tanto, localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables. (Navarro, 2012) Es decir, indica la capacidad del proceso natural de causar daño, bien por su magnitud (intensidad o severidad), dimensión espacio temporal (área afectada y durante cuánto tiempo, y/o por su frecuencia de ocurrencia (periodicidad) (Rodríguez, García, & Menéndez, 2016)

Detonante: Aquellos factores externos que inducen a un comportamiento dinámico activo, y que a partir de las condiciones iniciales generarán mayor o menor intensidad del fenómeno. (Navarro, 2012)

Precipitación: Es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye: lluvia, nieve y granizo. (También rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total) (Sánchez, 2016)

Cuenca: Unidad natural, cuyos límites físicos son definidos por la divisoria superficial de las aguas. Ante la ocurrencia de precipitaciones y la existencia de flujos o caudales base, permite configurar una red de drenaje superficial que canaliza las aguas hacia otro río, al mar, o a otros cuerpos de agua, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión en la zona de menor altitud. (Cervantes, 2008)

API: (Interfaz Programable de Aplicaciones) Conjunto de clases y métodos, que encapsulan las propiedades de los objetos para ser implantados en diferentes ambientes de programación. (Mata, 2004)

Mashup: Aplicación Web híbrida. Aplicación que basa sus contenidos en los de otras páginas Web, integrándolos y creando una nueva página que ofrece un servicio distinto. Un mashup accede a los servicios que otras páginas proporcionan de forma pública dando un uso distinto a estos en un nuevo contexto (Olaya, 2014)

RESUMEN

Los movimientos de ladera son fenómenos naturales complejos que involucran una gran cantidad de parámetros, los cuales se interrelacionan entre sí y pueden repercutir en la población, la infraestructura y bienes del territorio expuesto al evento. Una de las herramientas para el estudio de éstos fenómenos naturales es el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten representar y operar distintas fuentes de datos para realizar análisis espacial de una zona. En el presente trabajo se llevó a cabo la modelación de los procesos con el objetivo de delimitar una subcuenca, determinar la respectiva red de drenaje y calcular parámetros morfométricos. Además, se realizó la Evaluación Multicriterio para la determinación de la susceptibilidad ante movimientos en masa, valorando para ello los factores condicionantes de la subcuenca. Los factores evaluados fueron: la pendiente, litología, estructuras, usos del suelo y cercanía a la red de drenaje, y a los cuales se les asignaron pesos según la importancia de cada factor a través de un Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Luego, se realizó un análisis de precipitaciones máximas en la zona objeto de estudio que podrá servir como base para futuros estudios de peligrosidad. Finalmente se realizó una aplicación web para la representación de las capas de entrada y salida mediante el formato de intercambio de datos JSON y usando la API de leaflet.

Palabras Clave: Movimientos en masa, Vulnerabilidad, SIG, Evaluación Multicriterio, AHP, aplicación web mapping, leaflet, geojson

ABSTRACT

Hillside movements are complex natural phenomena that involve a large number of parameters, which are interrelated and can affect the population, infrastructure and properties of the territory exposed to the event. One of the work tools for the study of these natural phenomena is the use of Geographic Information Systems (GIS), which allows the representation and operation of different data sources for spatial analysis of studied area. In the present work, the modeling of the processes was realized with the objective of delimiting a sub- watershed, determining the drainage system and calculating morphometric parameters. Moreover, the Multicriteria Evaluation was realized to determine the susceptibility to mass movements, so for that reason the conditioning factors of the sub-watershed was assed. The following factors were evaluated: slope, lithology, structures, land uses and proximity to the drainage system and also data according to the importance of each factor through to Analytic Hierarchy Process (AHP). In the next step, a maximum precipitation analysis was performed in the study area that may serve as a basis for future studies. Finally, a web application was created to represent the input and output layers using the JSON data exchange format and using the API leaflet.

Keywords: Mass movements, Vulnerability, GIS, Multicriteria Assessment, AHP, web-mapping application, leaflet, GEOJSON

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de ladera en España tienden a presentarse mayormente en zonas montañosas y en grandes cuencas fluviales terciarias como la del Guadalquivir, Tajo y Duero (IGME, s.f.). Debido a que el relieve accidentado y montañoso, sumado a las características litológicas, como la baja compactación de los suelos o presencia de rocas sedimentarias y fracturas, inducen en la generación de estos fenómenos. Además, pueden ser potenciados por condiciones meteorológicas (especialmente los regímenes de precipitación).

Así, para que se generen dichos movimientos es necesaria la presencia de factores condicionantes, y desencadenantes o detonantes. Los primeros son los propios de la ladera, como el substrato geológico, la pendiente, el relieve, y la vegetación. Mientras que los factores detonantes son externos que activan el movimiento, como la precipitación, la actividad sísmica y las actividades antrópicas (Copons & Tallada, 2009). Siendo el principal detonante de movimientos de ladera en España, la lluvia (debido a episodios extremos, intensos y periodos de lluvias prolongados) y a las actividades antrópicas las cuales modifican las condiciones de estabilidad (IGME, s.f.).

A escala mundial, se ha presentado un aumento de catástrofes causadas por fenómenos naturales y, por tanto, un crecimiento de los daños a la población (Copons & Tallada, 2009). Sin embargo, la mayoría de los deslizamientos que ocurren, producen únicamente daños materiales y generalmente un número reducido de víctimas (Remondo, y otros, 2003). Así en el territorio español, se estima que los daños producidos por deslizamientos han ascendido a unos 42 millones de euros anuales (actualizados al 2000). (Ayala, Olcina, & Vilaplana, 2004)

Debido a estas afectaciones sobre la población y con el fin de reducir así, la pérdida de vida y daños materiales, se requiere una mejora en la gestión del riesgo, para poder prevenir y asegurar el correcto uso del territorio, mediante el conocimiento de las zonas que potencialmente pueden sufrir dichos fenómenos. Es desde esta perspectiva que los SIG intervienen en este tipo de análisis, ya que permiten el trabajo con múltiples variables, aplicación de algoritmos y operaciones y su distribución espacial.

Así, para el desarrollo del presente estudio, se hace uso de los SIG mediante la aplicación de herramientas de geoprocésamiento automatizadas. Esta modelación se realiza para determinar la subcuenca, la red de drenaje y los parámetros morfométricos. Además, para llevar a cabo el método de Evaluación Multicriterio; ya que este método resulta útil cuando se tienen múltiples factores a evaluar con diferentes grados de incidencia o repercusión en la zona. Para determinar los diferentes grados o peso de los factores se implementa el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), y una vez determinado cada peso según la influencia que representan en la subcuenca, se determina la susceptibilidad ante movimientos en masa de subcuenca mediante la superposición de las capas ponderadas.

Para evaluar además de la susceptibilidad a movimientos en masa, la influencia del factor detonante de precipitaciones en la subcuenca, se lleva a cabo un estudio de precipitaciones máximas, que puede servir para posteriores estudios de peligrosidad en la subcuenca.

Paralelamente se desarrolla una aplicación web para la consulta de los factores condicionantes y la susceptibilidad a movimientos en masa en subcuenca. Además, de representar la visualización de

las capas, la aplicación web permite manipular la información geográfica, transferir los datos de forma más eficiente y potenciar el trabajo colaborativo. Para realizar el visor del presente trabajo se hace uso del formato de intercambio de datos JSON y de una interfaz de programación de aplicaciones API de leaflet para su visualización; ya que esta API es una librería de acceso libre, sencilla y bien documentada.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa de la subcuenca del arroyo Quijorna (Madrid, España) con el uso de Sistemas de Información Geográfica.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Automatizar la generación de cuencas hidrográficas y de cartografía de susceptibilidad a través de herramientas de geoprocado usando ModelBuilder para la representación y secuencia de los flujos de trabajo.

Identificar los factores condicionantes que influyen en eventos de movimientos de ladera, y reclasificarlos de acuerdo al grado de susceptibilidad de la subcuenca a dichos fenómenos.

Revisar la incidencia del principal factor detonante de movimientos de ladera en la zona de estudio, mediante el análisis de las precipitaciones máximas en la subcuenca para diferentes períodos de retorno.

Implementar un visor web de los factores condicionantes y de la susceptibilidad de la subcuenca del arroyo Quijorna, mediante el formato de intercambio de datos JSON y la API de leaflet.

2. MARCO TEORICO

A continuación, se describen los conceptos relacionados con los movimientos en masa y la valoración de la susceptibilidad ante estos fenómenos, mediante la evaluación de los factores condicionantes, como la litología, la pendiente, usos del suelo, cercanía a estructuras y a cursos de agua.

2.1 El riesgo

El riesgo se define como una situación de pérdida potencial de bienes materiales o de amenaza potencial a la integridad del ser humano (ICOG, 2008). Entendiéndose así, como las consecuencias negativas más probables que pueden resultar del impacto de un evento sobre el área expuesta. También se considera como una combinación de *peligrosidad*, *vulnerabilidad* y *exposición* (García M. , 2009). Y según el origen del peligro se clasifican en riesgos naturales, cuando proviene de procesos físico químicos y biológicos que gobiernan la dinámica natural en la tierra (García , 2005) y en riesgos antrópicos derivados de las acciones emprendidas por el ser humano.

Entendido el concepto asociado al riesgo, se aborda la determinación o cuantificación de éste, para lo cual es necesario determinar las componentes del riesgo de forma separada según lo propuesto por la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre (UNDRO, 1991) ver figura 1.

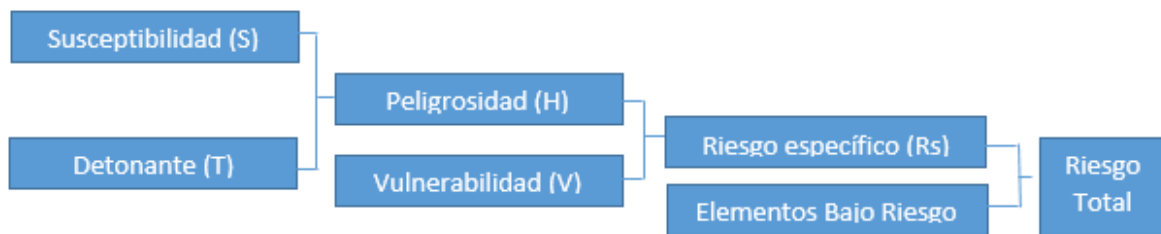


Figura 1 Esquema de las relaciones entre conceptos relacionados al riesgo. . Fuente: (García M. , 2009)

Donde la *susceptibilidad* indica la predisposición del terreno a la ocurrencia del fenómeno, el *detonante* es la acción de inicio del fenómeno, y la combinación de ambos definen la *peligrosidad* como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno perjudicial dentro de un período de tiempo y área determinada (Moral, 2014); y si se incorpora la *vulnerabilidad* o grado de fragilidad de los elementos expuestos ante el proceso, tanto naturales como sociales, (personas, bienes y servicios) se puede obtener el *riesgo específico*, el cual representa la pérdida esperada en un cierto *elemento* debido a un fenómeno natural. Así, el *riesgo total* corresponde, entre otras, al número de vidas pérdidas, daños a la propiedad, debidas a un fenómeno en concreto.

2.2 Movimientos en masa

Una vez definido el concepto asociado al riesgo y los componentes para su cuantificación, se llevan al caso de los movimientos de ladera, al ser de los peligros naturales más importantes a nivel mundial tras las inundaciones (García , 2005). Dichos fenómenos son deslizamientos o movimientos de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente (Cruden, 1991).

Así, los cambios en las condiciones de estabilidad de las laderas, se manifiestan en movimientos gravitacionales de masas, generalmente a través de superficies fracturadas. Estos movimientos de ladera están condicionados por factores inherentes o propios de la zona, como lo son: la litología, la estructura, propiedades geomecánicas de los materiales, las pendientes, estructura de las laderas y condiciones hidrogeológicas. Además los factores externos o detonantes influyen en la activación del movimiento, como los terremotos, erupciones volcánicas, suelos saturados por fuertes precipitaciones, socavamiento de los ríos (Abril, 2011), acción de agentes erosivos (ríos, oleaje, nieve), actividad biológica y actividades antrópicas (excavaciones, voladuras, sobrecargas...) (García , 2005).

2.2.1 Clasificación de los movimientos de ladera

Los movimientos de ladera generan remoción de material de su posición preexistente, produciendo así una pérdida de suelo útil, lo que lleva a la formación de escarpes. De acuerdo a Varnes, éstas masas que se encuentran en movimiento, se pueden clasificar en base al mecanismo de rotura y propagación del movimiento en las siguientes categorías (Varnes, 1978):

- Desprendimiento o caída de rocas: movimiento en caída libre de una masa de cualquier tamaño de roca o de suelo en forma de bloques aislados o material masivo. Son típicos en macizos rocosos y generalmente ocurren en laderas fuertemente inclinadas (García M. , 2009). El movimiento es extremadamente rápido, y puede ser o no, precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque. Además, suelen ocurrir en pendientes superficiales de más de 75°, ya que en ángulos menores los materiales generalmente rebotan y en taludes menores a 45° tienden a rodar (Suarez, 1998). Estas caídas se originan debido a cambios en los esfuerzos cortantes de las rocas (infiltración de agua en las grietas, procesos de hielo-deshielo en climas fríos, meteorización de la roca, sismos, entre otros) (Lara, 2007).

- Volcamiento o toppling: consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje determinado por su centro de gravedad. Pueden producirse tanto en formaciones rocosas como en depósitos no consolidados (Moral, 2014). Las fuerzas que los producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas, expansiones y movimientos sísmicos. Los materiales afectados son, formaciones sedimentarias y metamórficas, por lo general de fuerte buzamiento y en pendientes contrarias, siendo los esquistos los más sensibles a este doblamiento por los planos de plegamiento (Abril, 2011).

- Deslizamientos: desplazamientos del terreno que se producen sobre una o varias superficies de rotura bien definidas, comenzando así, en zonas donde se generan fallas locales. La masa

generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad, prácticamente sin deformación interna en su recorrido (García M. , 2009).

Los deslizamientos a su vez, pueden clasificarse en rotacionales y traslacionales. Los primeros ocurren a lo largo de superficies curvas y cóncavas, en materiales homogéneos, y su generación está asociada a pendientes entre 20° y 40°. Mientras que los deslizamientos traslacionales se generan en superficies de cizalle aproximadamente plana, donde la masa desliza por una superficie menos resistente (Lara & Sepulveda, 2008).

- Flujos: masas de material sin cohesión que fluyen como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido las cuales se forman en materiales poco consolidados. Son fenómenos estacionales, es decir, frecuentes en temporada de lluvias, ocurren muy rápido y por ende son muy peligrosos (Abril, 2011). Se pueden encontrar flujos de detritos, donde la mayor parte del material sólido corresponde a material particulado grueso, flujos de tierra, donde el material corresponde a la fracción más fina de los suelos no saturado, y flujos de barro, donde el material se compone principalmente de arena fina y el suelo se encuentra totalmente saturado (Lara & Sepulveda, 2008).

Muchos flujos se originan porque la cohesión del material se pierde dada la falla inicial y la masa continúa desplazándose ladera abajo como un fluido viscoso. Además, el transporte de estos flujos se encuentra dominado por las altas pendientes que luego se van canalizando por cauces preexistentes.

- Expansiones laterales: movimientos de masas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan desplazamientos casi horizontales. Son resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactas debido a la licuefacción (Moral, 2014). Este fenómeno se presenta en materiales sueltos y saturados, principalmente arenosos y limosos, los cuales adquieren comportamiento de fluido.

- Movimientos complejos: se dan cuando un movimiento de ladera presenta más de un mecanismo de movilización de material. Siendo así, el resultado de la transformación del movimiento inicial en otro tipo de movimiento al desplazarse ladera abajo. Estos deslizamientos están regidos por la acción de los esfuerzos residuales posteriores a la fase de ruptura (Abril, 2011). Entre los más importantes se tienen los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes.

La avalancha de rocas es un movimiento rápido de escombros de roca que puede comenzar con la ruptura a lo largo de una superficie de falla, especialmente en presencia de agua. Aunque dicho fenómeno no es común, es bastante peligroso, ya que se presenta de forma brusca sin previo aviso, pudiendo llegar a perturbar las cuencas naturales de drenaje e interceptando en ocasiones núcleos urbanos (González, 2003).

Los flujos deslizantes se tratan de colapsos estructurales de material que forma la ladera, con una fluidización momentánea en los que el material es un suelo con tendencia a compactar, de baja densidad. Estos flujos pueden ser ocasionados por una rotura inicial rotacional en la cabecera, vibraciones o choques, lluvias intensas, entre otras. (Haddad, 2007)

2.2.2 Factores condicionantes y desencadenantes

La distribución espacio temporal de los movimientos de ladera se encuentra condicionada por la presencia de factores propios de la ladera y de factores externos a ella.

Los factores inherentes o condicionantes, son los relativos a la propia naturaleza del terreno, y son de tipo:

- Geológicos: relacionados con el tipo de material que se encuentra en la ladera de acuerdo a la litología o tipo de roca, la cual determina la resistencia del suelo a degradarse. Además, las estructuras o presencia de fallas, plegamientos, o fisuras favorecen el deslizamiento.
- Hidrológicos: el agua se reconoce como factor importante en la estabilidad de las pendientes, casi tan importante como la gravedad (Abril, 2011). Ya que tiene la capacidad de acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de los suelos de acuerdo a la intensidad, frecuencia y magnitud de la precipitación (García M. , 2009).
- Geomorfológicos: se presenta por la suma de los factores litológicos que involucran la dureza o resistencia de los suelos a la erosión. Algunas características geomorfológicas son pendientes y la geometría de los taludes (Abril, 2011).
- Climáticos: de acuerdo a sus características pueden favorecer la inestabilidad.

Y los factores desencadenantes o externos, son los que inducen a un comportamiento dinámico activo. Dentro de los principales se encuentran, la intensidad del movimiento sísmico y las lluvias (García M. , 2009). Los factores desencadenantes pueden ser:

- Naturales: como las precipitaciones, la filtración del agua en el suelo, la variación de temperatura y los sismos. Siendo el agua el factor de mayor influencia, ya que la saturación de agua en los espacios intergranulares en las rocas provoca el debilitamiento de las condiciones estáticas de las fuerzas de fricción, y por lo tanto inducen al colapso de bloques o masas (Abril, 2011).
- Antrópicos: acciones provocadas por el hombre, como la deforestación, malas prácticas agrícolas y ganaderas, asentamientos humanos en laderas, entre otras.

2.3 Los movimientos de ladera en España

Los movimientos de ladera son los procesos geodinámicos que con mayor frecuencia y extensión se presentan en España (García M. , 2009). Debido a las características orográficas del territorio, en las regiones alpinas, en los relieves son más abruptos, y en las montañas intermedias, es donde se presenta mayor predisposición a la ocurrencia de los movimientos. Esta tendencia a dichos fenómenos también se presenta en las cuencas terciarias de Guadalquivir, Tajo y Duero, debido a la presencia de materiales arenosos arcillosos y/o yesíferos del suelo. Además de los relieves abruptos o el tipo de material geológico presente en la zona, las condiciones meteorológicas inducen este tipo de movimientos, especialmente la precipitación (IGME, s.f.).

Los factores que han causado movimientos de ladera en España, según la base de datos de movimientos de ladera de España (Ayala, 1995) se han recopilado en la tabla 1, y de la cual se interpreta que para el caso de avalanchas rocosas, el principal desencadenante de los movimientos es la lluvia torrencial, para los desprendimientos y caídas de bloques, es la erosión o pérdida de resistencia de la base de las laderas, junto a lluvias y alto grado de fracturación de los macizos, y en el caso de los flujos el factor desencadenante es la precipitación.

Tabla 1 Principales factores causantes de desprendimientos ocurridos en España

| Desprendimientos y caídas de rocas | Casos | % |
|--|-------|------|
| <ul style="list-style-type: none"> Factores desencadenantes | | |
| -Erosión o deslizamiento de la base, generalmente en formaciones blandas (principalmente desprendimientos graduales) | 24 | 32 |
| -Lluvias (principalmente caídas repentinas) | 16 | 21.5 |
| -Excavaciones (caídas repentinas) | 2 | 2.5 |
| <ul style="list-style-type: none"> Factores condicionantes definitivos | | |
| -Alto grado de fracturación del macizo rocoso | 23 | 31 |
| -Acciones del hielo | 1 | 1.5 |
| -Acciones térmicas | 7 | 9 |
| Total | 75 | 100 |
| Flujos | Casos | % |
| <ul style="list-style-type: none"> Factores desencadenantes | | |
| -Lluvia | 9 | 39 |
| -Inundación y erosión de la base de la ladera | 7 | 30.5 |
| <ul style="list-style-type: none"> Factores condicionantes definitivos | | |
| -Alto contenido de agua | 7 | 30.5 |
| Total | 23 | 100 |
| Avalanchas rocosas | Casos | % |
| <ul style="list-style-type: none"> Factores desencadenantes | | |
| -Lluvias torrenciales | 3 | 43 |
| -Lluvias | | |
| -Alto grado de fracturación del macizo rocoso | 2 | 28.5 |
| -Relieve abrupto | 2 | 28.5 |
| Total | 7 | 100 |

Fuente: (Ayala, 1995)

2.4 Sistemas de Información Geográfica

El estudio de susceptibilidad de movimientos de ladera, requiere del manejo de gran cantidad de información de variables, y es por ello que los SIG constituyen una herramienta útil para su determinación, pues permiten el almacenamiento, manipulación y representación de la información espacial.

Un SIG integra hardware, software y datos para capturar, administrar, analizar y visualizar la información espacial referenciada, por lo tanto, es una herramienta de análisis y de apoyo en la toma de decisiones, la cual permite realizar las siguientes operaciones (Olaya, 2014):

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Incluye desde consultas sencillas a desarrollo de complejos modelos.
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

2.4.1 ArcGis

ArcGis es una plataforma para crear y utilizar SIG. Desarrollado por Environmental Systems Research Institute (ESRI) de Redlands, California. El cual permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (ESRI, s.f.). Este software consta de tres módulos principales: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolBox.

ArcMap es el módulo básico de ArcGis. Esta extensión aporta métodos de análisis y creación de superficies 3D, perfiles y superficies de visualización, así como digitalización e incorporación de simbología. ArcCatalog es el módulo principal para la gestión de datos. Su funcionalidad es la previsualización de datos, así como la generación de nuevas capas (Feito & Segura, 2010). Y ArcToolBox es una aplicación que contiene herramientas de geoprocésamiento. Además, permite la instalación de extensiones y la creación de herramientas propias las cuales se pueden compartir con cualquier usuario de ArcGis.

Se pueden crear herramientas propias de ArcToolBox a partir de modelos, mediante la aplicación de ModelBuilder, el cual es un lenguaje de programación visual usado para realizar secuencias de procesos de análisis espacial. Además, permite editar, administrar y ejecutar dichos flujos de trabajo. Y es por ello una aplicación útil en la automatización y documentación de procesos.

Dentro de las principales herramientas de geoprocésamiento usadas en la modelación del presente trabajo se encuentra *Weighted Overlay*, la cual se encuentra disponible en la extensión Spatial Analyst (herramienta dedicada al análisis y modelado espacial). *Weighted Overlay* resuelve la selección de sitios de acuerdo a varios criterios, superponiendo diferentes formatos raster con una escala de medición común y ponderados cada uno según su influencia o importancia.

2.4.2 Aplicaciones Web Map

Se entiende por tecnologías Web SIG a todos aquellos elementos que permiten la representación de cartografía como un contenido más, de una página Web. Dentro de las características aportadas por estas aplicaciones se tienen (Olaya, 2014):

- No es necesario un software SIG específico. Al menos, no es necesario desde el punto de vista del usuario, que no ha de instalar nada adicional en su ordenador.

- Potenciamiento del trabajo colaborativo. Los SIG dejan de estar reducidos al ámbito de un ordenador o una pequeña red, para ser algo global en una red de muchos SIG interconectados. Además, los datos también se hacen globales, pudiendo ser empleados e incluso editados por todos.

- Información más actualizada, incluso en tiempo real. La Web es el canal ideal para transmitir la información de forma inmediata y flexible.

- Independencia del sistema. Un mapa Web puede verse y usarse del mismo modo en cualquier ordenador, con independencia del sistema operativo, el navegador e incluso el dispositivo empleado.

- Personalización de aplicaciones. Creación de aplicaciones o mashups, que personalizan una base común para un determinado uso. La riqueza de los mashups es la integración de funcionalidades de distintos proveedores, para crear un nuevo servicio usando normalmente servicios Web y “Application Programming Interfaces” (APIs).

Las API o librerías programables para la web, hacen referencia a la agrupación de funciones y métodos en un único fichero que un programador puede reutilizar en sintonía para el desarrollo de sus propias aplicaciones. A esta categoría pertenecen las API para la creación de mapas en la web como Google Maps, OpenLayers y Leaflet (Aguilar & Granell, 2015) y las cuales se describen a continuación:

Google Maps: librería con amplia documentación, con licencia gratuita siempre que no sea para uso comercial. Antes de usar la API, es necesario obtener una clave personal y única para cada sitio web donde se quiera utilizar. Las claves se solicitan por cada ruta del servidor (Aguilar & Granell, 2015).

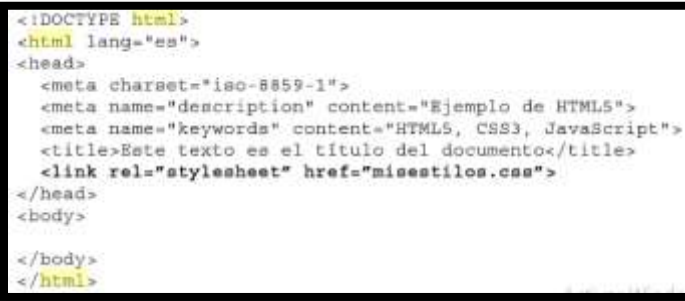
OpenLayers: librería JavaScript Open Source, desarrollado y mantenido por el Open Source Geoespatial Foundation (OSGeo), aunque originalmente fue desarrollado por MetaCarta en 2005 con el objetivo de ser la alternativa libre a otras librerías como Google Maps (Soler, 2015). Actualmente OpenLayers es un proyecto estable y maduro, desarrollado en Javascript que soporta variedad de estándares abiertos (WMS, WFS, JSON...) y propietarios (Google, Yahoo...), lo que permite la visualización de datos de diferentes proveedores; además, soporta varios sistemas de referencia y funciones de transformación de coordenadas, y se encuentra en función de la versión de OpenLayers a utilizar.

Leaflet: librería JavaScript Open Source desarrollada principalmente por Vladimir Agafinkin, de CloudMade en 2011. Aunque no tiene tanto tiempo respecto a otras librerías, su carácter Open

Source y el hecho de ser ligera y manejable, hacen que tenga bastante apoyo. Utiliza un sistema de plugins para extender sus capacidades y proveer funcionalidades (Sierra, 2013). Al igual que OpenLayers, da soporte a WMS, GeoJSON y KML, entre otros. Sin embargo, no da soporte a GML ni WFS, aunque para el último existen plugins. (Soler, 2015)

En este trabajo es de interés el uso de HTML5, CSS, JavaScript y GeoJSON ya que forman parte de la estructura de la aplicación Web, por ello a continuación se presenta una breve descripción de cada uno:

HTML (Hyper Text Markup Language): lenguaje de marcado estandarizado por el World Wide Web Consortium (W3C) y el Hypertext Application Technology Working Group (WHATWG), usado para escribir y estructurar el contenido de un documento web, de forma que sea legible para el navegador (Sotelo, 2013). La especificación más reciente de este lenguaje es el HTML5, el cual provee básicamente tres características: estructura, estilo y funcionalidad, y es considerado el producto de la combinación de HTML, CSS y Javascript (Gauchat, 2012). Los documentos HTML se encuentran organizados por etiquetas los cuales se conforman por la palabra y se rodean con los símbolos "<", ">". Con <!DOCTYPE html> se indica el tipo de documento creado, <html> representa la estructura que envuelve al resto del código y el atributo lang define el idioma del documento. El documento presenta dos secciones al igual que las versiones previas de HTML, de cabecera y cuerpo. En <head> se define el título de página y declaran caracteres, se provee información general del documento, y se incorporan archivos externos y <body> representa la parte visible del documento. En la cabecera la etiqueta <meta> especifica la presentación del texto en pantalla, la etiqueta <title> define el título del documento y la etiqueta <link> es usada para incorporar estilos, códigos javascript o imágenes desde archivos externos, siendo el más común el archivo de estilos CSS. Ver figura 2.



```
<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
  <meta charset="iso-8859-1">
  <meta name="description" content="Ejemplo de HTML5">
  <meta name="keywords" content="HTML5, CSS3, JavaScript">
  <title>Este texto es el título del documento</title>
  <link rel="stylesheet" href="misestilos.css">
</head>
<body>
</body>
</html>
```

Figura 2 Estructura básica de una página HTML. Fuente (Gauchat, 2012)

CSS (Cascading Style Sheets): definen como se muestran los elementos HTML, y favorecen la reutilización del estilo en diferentes HTML, al encontrarse de forma independiente del contenido. Para vincular una hoja de estilo externa, se usa la etiqueta <link> en la sección de cabecera.

JavaScript (JS): lenguaje de script orientado a objetos, enfocado principalmente a la web por lo que puede ser embebido dentro de las páginas HTML. Así, mientras que HTML se utiliza para almacenar y dar formato a una página web, CSS para dar el estilo de presentación, JavaScript es usado para crear aplicaciones web enriquecidas (Sotelo, 2013).

JSON (JavaScript Object Notation) es un formato sencillo para el intercambio de la información el cual permite representar estructuras de datos (arrays) y objetos (arrays asociativos) en forma de texto. La notación de objetos mediante JSON es una de las características principales de JavaScript y es un mecanismo definido en los fundamentos básicos del lenguaje. (Eguiluz, 2008)

2.5 Metodologías de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos

La obtención de cartografía de susceptibilidad a deslizamientos, se basa en el uso métodos directos e indirectos. Los métodos directos o empíricos acuden a la representación a modo de inventario, de los movimientos ocurridos en el pasado, basándose en criterios geomorfológicos. (Bonachea, 2006). Mientras los métodos indirectos se basan en la identificación los factores que controlan dichos movimientos y creación de modelos que sirvan para localizar las áreas inestables (Tambo, 2011). A continuación, se presentan las metodologías usadas en la evaluación de mapas de susceptibilidad del terreno a deslizamientos:

Metodología determinística: se usa para estudios de estabilidad de ladera o talud concreto. Están basados en modelos numéricos, en donde los datos de entrada son parámetros geotécnicos derivados de ensayos en laboratorio a fin de calcular el factor de seguridad de la ladera.

Metodología heurística: se basa en el conocimiento a priori de los factores que producen la inestabilidad de laderas (Carraca & Guzzetti, 1993). Los factores se ordenan y ponderan según un valor que se asume en la formación del deslizamiento. Sin embargo, es un método subjetivo, pues depende del juicio de expertos.

Metodología probabilística: se basa en las relaciones entre cada factor y la distribución del deslizamiento actual y pasado (Carraca & Guzzetti, 1993). Estos métodos se caracterizan por su objetividad, sin embargo, se requiere de gran cantidad de información cualitativa y cuantitativa (García M. , 2009).

2.5.1 Análisis Multicriterio

De las metodologías descritas en la sección 2.5, se considera seguir la semicuantitativa o heurística, ya que se cuenta con información de factores que condicionan la inestabilidad en ladera y debido al alto grado de información que representan la aplicación de las otras metodologías. Para este desarrollo se hace uso del método de evaluación multicriterio (EMC) (García M. , 2009).

La evaluación multicriterio es el conjunto de operaciones para lograr un objetivo, que en este caso es la zonificación de la inestabilidad, teniendo simultáneamente en consideración todas las variables que intervienen (Barredo, 1996), simplificando situaciones complejas con la integración de la información en su valoración. (Fernández, 2008). Este método es considerado especialmente

útil para la evaluación de la susceptibilidad a escalas intermedias (1:25000 y 1:50000) y en zonas donde no se dispone de datos geotécnicos o hidrogeológicos para la aplicación de métodos determinísticos. (Hervás, Barredo, & Lomoschitz, 2002)

Para el desarrollo de la evaluación multicriterio se hace uso del Método AHP (Analytic Hierarchy Process), propuesto por Saaty, el cual realiza una jerarquización de los criterios a evaluar, determinando así, las variables de alta preferencia (Saaty T. a., 1980) en (Fernández, 2008). A continuación, se explican los principios para llevar a cabo la evaluación de los componentes del modelo jerárquico (Saaty T. a., 1980)

Construcción de las jerarquías, en donde el problema o fenómeno es descompuesto en elementos constituyentes, o en las partes que lo componen (Hurtado & Bruno, 2005).

Establecimiento de prioridades, consiste en dar una importancia relativa o prioridad a cada elemento en una matriz de comparación de pares. Para valorar las prioridades se usa la escala de Saaty, ver tabla 2.

En la matriz de comparaciones pareadas, ver figura 3. siendo w_i el peso dado al criterio i , se satisface que para el elemento w_{ij} , si $i=j$ el valor será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma. Además, se cumple que $w_{ij} \cdot w_{ji} = 1$. Por tanto, $w_{ji} = 1/w_{ij}$

Posteriormente es necesario realizar la normalización de la matriz de comparaciones pareadas, debido a que el rango de valores finales de cada parámetro es diferente. Para ello se divide cada elemento de la matriz entre la suma de todos los elementos de la columna j de dicha matriz.

Tabla 2 Escala de Saaty

| Escala numérica | Escala verbal | Explicación |
|-----------------|---|---|
| 1 | Igual importancia | Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio |
| 3 | Moderadamente más importante un elemento que el otro. | El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro |
| 5 | Fuertemente más importante un elemento que en otro | El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro. |
| 7 | Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro. | Un elemento domina fuertemente, (probada en práctica) |
| 9 | Importancia extrema de un elemento frente a otro | Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible |

Fuente: (Saaty T. , 1994)

*Los valores 2,4,6,8 se usan en situaciones intermedias. Fuente: (Moreno, 2006)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 3 Matriz de comparaciones pareadas . Fuente: (Hurtado & Bruno, 2005)

$$\begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

Figura 4 Matriz de comparaciones pareadas. $AW = nW$. Fuente: (Hurtado & Bruno, 2005)

Consistencia lógica: se dice que la matriz A es consistente si y solo si $AW = nW$. Donde W es un vector columna de pesos relativos que se obtiene con el promedio de los n elementos de la fila en la matriz normalizada, ver figura 4.

El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia resultante entre las comparaciones pareadas, mediante la ecuación 1

$$R.C. = \frac{I.C.}{I.A.}$$

Ecuación 1 Razón de consistencia

Donde R.C. es la razón de consistencia, I.C. es el índice de consistencia, I.A. es el índice aleatorio

El índice de consistencia I.C. se calcula de acuerdo a la ecuación 2.

$$I.C. = \frac{n_{max} - 1}{n - 1}$$

Ecuación 2 Índice de consistencia

Donde $n_{max} = A\bar{W}^T$ n_{max} = máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares, n = número de criterios.

El Índice de Consistencia Aleatoria I.A. depende del número de elementos a comparar, y asume los valores de acuerdo al tamaño de la matriz, ver tabla 3.

Tabla 3 Índice de consistencia aleatoria

| Tamaño de la matriz | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| IA | .00 | .00 | .58 | .90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

Fuente: (García J. , 2012)

El valor de la razón de consistencia R.C. no debe superar el 10%, pues si la R.C. es mayor a este porcentaje, los juicios o valores de preferencia obtenidos en la matriz pareada resultan inconsistentes, y por tanto se debe revisar nuevamente la matriz y solucionar la inconsistencia.

Una vez comprobada R.C. ya con las preferencias o pesos, se puede obtener el índice de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante la suma lineal ponderada de pesos, ver ecuación 3

$$I = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij}$$

Ecuación 3 índice de susceptibilidad

Donde I es el índice de susceptibilidad, W_j es el peso del factor j, x_{ij} es el peso de la clase i del factor j.

La ecuación 3, para este caso de estudio se puede traducir en la ecuación 4, como la superposición de varias capas ponderadas cada una de acuerdo a su importancia.

Susceptibilidad

$$\text{Grid Litología} * W_L + \text{Grid Pendiente} * W_P + \text{Grid UsoSuelo} * W_{US} + \text{Grid Estructuras} * W_E + \text{Grid Cursosagua} * W_A$$

Ecuación 4 Susceptibilidad

El método de superposición ponderada, requiere que las capas a usar se encuentren en formato ráster, luego se deben reclasificar dichas capas y asignar una escala en común, posteriormente se debe ponderar cada una, de acuerdo los pesos obtenidos por el método AHP.

Un ejemplo de superposición de formatos ráster se encuentra en la figura 5. Donde se presentan dos capas ráster clasificadas en una escala de medición común de 1 a 3. Además, cada capa tiene un porcentaje de influencia, del 75% y 25%. Entonces los valores de cada pixel se multiplican por su peso o influencia y luego se suman para generar el ráster de salida. Por ejemplo: $(2 \times 0,75) = 1,5$ y $(3 \times 0,25) = 0,75$, entonces $1,5 + 0,75 = 2,25$ que se redondea a 2, ya que el raster de salida solo toma valores enteros.

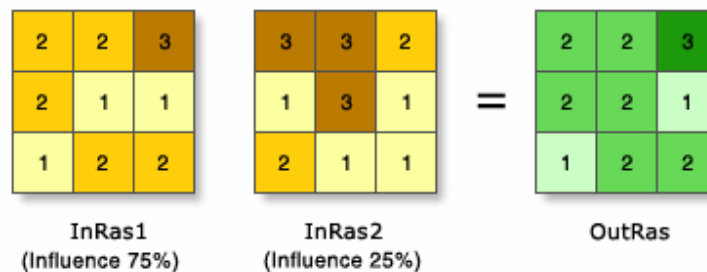


Figura 5 Ejemplo ponderación de dos capas ráster. Fuente: (ESRI, 2016)

La escala de las capas de entrada de los ráster que se usa en el presente trabajo toma valores de 1 a 5, de acuerdo a la susceptibilidad, ver tabla 4

Tabla 4 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento

| Clase | Calificativo | Característica |
|-------|--------------|---|
| 1 | Muy baja | Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificaciones |
| 2 | Baja | Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad. |
| 3 | Moderada | No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, entre otros. Recomendable para usos urbanos de baja densidad. |
| 4 | Alta | Probabilidad de deslizamiento alta (<50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección. |
| 5 | Muy alta | Probabilidad de deslizamiento muy alta (>50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección. |

Fuente: (Mora R. , 2004)

2.5.1.1 Variables de la evaluación multicriterio

Una vez entendido el método de evaluación multicriterio, se realiza una descripción de los factores condicionantes como: la litología, la pendiente, la vegetación y las estructuras. Ya que éstos determinan la susceptibilidad de movimientos de ladera en la subcuenca.

Litología: la geología es una de las principales variables ambientales que intervienen en la estabilidad de las laderas o taludes. Puede ser valorada a partir de propiedades como: su composición mineralógica, textura, estructura, grado de meteorización y de fracturamiento (Abril, 2011). Por ejemplo, los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de faldas, aluviales, coluviales, y de antiguos detritos, son susceptibles a ser movilizados, pues son materiales permeables, donde el agua se infiltra fácilmente, superando la capacidad de infiltración y produciendo una rápida saturación. (Hauser, 1997). En el caso de las rocas, la presencia de minerales secundarios (ceolitas, arcillas, sericita, clorita), característicos de alteraciones hidrotermales, aceleran los procesos de meteorización. (Jacoby, 2001) en (Lara, 2007)

La evaluación de la susceptibilidad litológica (SI) puede realizarse según lo especificado en la tabla 5, de acuerdo a la categoría de (Mora & Vahrson, 1992)

Tabla 5 Valoración de la susceptibilidad litológica

| Litología | Cualificación | Factor SI |
|---|---------------|-----------|
| Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo, calizas duras permeables, rocas intrusivas, poco fisuradas, bajo nivel freático Basaltos, andesitas, ignimbritas Características físicas mecánicas: materiales sano con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno | bajo | 1 |
| Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, poco fisuradas, rocas intrusivas, calizas duras Características físico mecánicas: resistencia al corte media a elevada,... | moderado | 2 |
| Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas,... niveles freáticos relativamente altos | medio | 3 |
| Aluviones fluvio lacustres , Suelos piroclásticos poco compactados, rocas fuertemente alteradas,... | alto | 4 |
| Materiales aluviales, coluviales de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados | muy alto | 5 |

Fuente: (Mora & Vahrson, 1992)

Pendiente: es un factor determinante de la estabilidad de las laderas, ya que la inclinación está asociada a la efectividad de la fuerza de gravedad, por lo que generalmente las pendientes más inclinadas tienen más probabilidad de deslizamientos (Abril, 2011). En la tabla 6 se presenta el umbral para la generación de distintos tipos de remociones en masa.

Tabla 6 Umbral de pendiente

| Pendiente (°) | Pendiente (%) | Concepto | Umbral |
|---------------|---------------|--------------|---|
| 0-2 | 0-4.5 | Horizontal | Erosión nula a leve |
| 2-6 | 4.5-11 | Suave | Erosión débil, difusa, inicio de regueras, soliflucción fría |
| 6-10 | 11-22 | Moderada | Erosión moderada a fuerte, inicio de erosión lineal, desarrollo de regueras, presencia de flujo atenuado, deslizamiento (15% en arcillas) |
| 10-20 | 22-44.5 | Fuerte | Erosión intensiva, erosión lineal frecuente, cárcavas incipientes |
| 20-30 | 44.5-67 | Muy fuerte o | Cárcavas frecuentes, movimientos en |

| | | | |
|---------------|--------|-------------------------------|--|
| | | moderadamente escarpada | masa, reptación, <25° flujos, deslizamientos (20° en arenas) |
| 30-45 | 67-100 | Escarpada | Coluviamiento solifuxión intensa, inicio de derrubación |
| >45 | >100 | Muy escarpada o acantilada | Desprendimientos y derrumbes, corredores de derrubios frecuentes. |

Fuente: (Elmes, 2006)

Vegetación: el tipo y densidad de vegetación representa un parámetro importante para la estabilidad debido a las funciones que cumple en la ladera (Gray & Leiser, 1982):

- ✓ Retención: físicamente, el sistema de raíces retiene las partículas del suelo, ya que refuerzan la estructura y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades. Además, las partes aéreas funcionan como trampas de sedimentos.

La profundidad de las raíces es un factor importante, ya que algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos (Suarez, 1998), como la vegetación leñosa, la cual además provee efectos mecánicos e hidrológicos que favorecen la estabilidad.

- ✓ Infiltración: propiedades del suelo como, la textura, la porosidad, grado de compactación y espesor, determinan junto al tipo y densidad de vegetación, la cantidad de infiltración de agua. Debido al aporte de materia orgánica, al sistema radicular y a la estimulación de actividad biológica del suelo.
- ✓ Retardación: cuando la lluvia intercepta al follaje, una parte es retenida y evaporada, disminuyendo así la velocidad de escorrentía, y por tanto a su capacidad erosiva. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje, retardan más el ciclo hidrológico, en razón de que retienen por mayor tiempo la cantidad de lluvia. Además en hierbas y pastos la densidad y volumen de follaje actúan como colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía.(Suarez, 1998)
- ✓ Evapotranspiración: su efecto es el agotamiento o disminución de la humedad en el suelo, además profundiza los niveles de aguas freáticas, manteniendo así, la humedad por debajo del nivel de saturación, y mejorando la estabilidad de las laderas.

Debido a estas funciones de la vegetación, se debe tener en cuenta esta variable al momento de determinar la susceptibilidad a movimientos de ladera. Además, se ha comprobado que muchos deslizamientos son iniciados en zonas con escasa vegetación, suelos desnudos, deforestados o reforestados con otras especies vegetales (Navarro, 2012).

Estructuras: se refiere al sistema de discontinuidades en la masa de la roca, o superficies a lo largo de las cuales, la consistencia de la roca se interrumpe (Suarez, 1998). Las fallas y diaclasas son las principales discontinuidades de origen tectónico, y se diferencian principalmente en que en las

primeras existen evidencias de movimiento relativo entre bloques a ambos lados de la misma, mientras que en las segundas no se reconocen evidencias de movimiento (Delgado, Padilla , & Barrientos, 2010).

Las fallas son superficies de discontinuidades deformacionales, donde ha ocurrido desplazamiento de las masas de roca (Suarez, 1998). Corresponden a puntos de la corteza terrestre más susceptibles de ser meteorizados (Delgado, Padilla , & Barrientos, 2010). Además, las fallas actúan como camino preferido del agua, debido a que la roca se encuentra fracturada, y su acción a su paso por la falla produce meteorización química, lavado y erosión, incrementando así, la abertura de la superficie (Suarez, 1998).

Dentro de los tipos de fallas se tienen (Aguilar, 2004):

- Falla normal: sucede cuando un bloque de capas rocosas se fractura, entonces una parte se eleva y la otra se hunde. En este caso, el plano de falla se inclina en cualquiera de los puntos cardinales
- Falla inversa: es el proceso contrario a la falla normal, donde un bloque se eleva siguiendo el plano inclinado de la falla y termina por derrumbarse sobre el otro.
- Falla vertical: es la falla más común. Un bloque se levanta y otro se hunde, casi sin inclinación en el plano de la falla.
- Falla horizontal: los bloques se mueven lateralmente a lo largo del plano de la falla. Sin desplazamiento vertical.
- Dextra y sinistra: estos términos aplican para caracterizar el movimiento de las fallas. Así, si la componente horizontal del desplazamiento es hacia la derecha, la falla se denomina dextra, mientras que si es hacia la izquierda la falla es sinistra o levógira.

Las estructuras tectónicas como los pliegues y fallas, se encuentran asociadas a extensas zonas de fractura y fuertes anomalías de relieve, favoreciendo condiciones para deslizamientos de tierra (Abril, 2011). En la placa ibérica, el patrón de deformación muestra unas pautas muy constantes de orientaciones de fallas (SGE, 2004), donde las cuencas relacionadas con el Macizo Ibérico, (Duero y Tajo) presentan una baja deformación tectónica (Civis, y otros, 2004), representados en la figura 6.

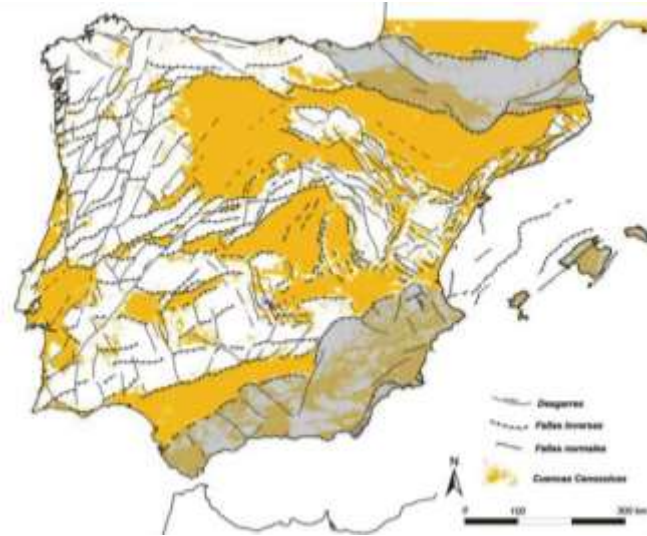


Figura 6 Fallas de la península Ibérica. Fuente: (SGE, 2004)

2.6 Detonante por precipitaciones

Después de realizar una descripción de los factores condicionantes de los movimientos de ladera, se incluye la importancia de las precipitaciones como un factor externo que induce a la generación de dichos fenómenos naturales.

Los deslizamientos por causa de lluvias se relacionan con el volumen, la intensidad y la distribución de las precipitaciones. Por ello se debe tener en cuenta la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses y años. Ya que se tienen dos tipos de efectos principales de la precipitación: el efecto acumulativo de la lluvia o precipitación de largo plazo y el efecto inmediato de la lluvia o precipitación de corto plazo (Mayorga, 2003).

Las lluvias antecedentes a eventos de movimientos en masa, se caracterizan por tener una mayor frecuencia aunque una menor intensidad, lo cual favorece la infiltración, generando formación de humedad en el suelo, que, tras irse acumulando, elevan las presiones de poro y disminuyen su resistencia al esfuerzo cortante, dando lugar a situaciones de inestabilidad (Vega, 2013).

En la práctica, la incorporación de factores dinámicos o detonantes se lleva a cabo mediante métodos estadísticos o físicos. Los primeros, definen umbrales críticos que relacionan la intensidad y la magnitud de la lluvia con la ocurrencia del evento (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010). Mientras que los métodos físicos explican la ocurrencia de movimientos en masa combinando análisis geotécnicos y análisis hidrológicos para determinar la cantidad de lluvia requerida para aumentar las presiones de poro del suelo (Terlien, 1998).

Cuando se tienen datos de movimientos superficiales y series continuas de lluvias asociadas a procesos de remoción en masa, se pueden establecer correlaciones de intensidad, y duración de lluvia (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010). Mediante el umbral crítico de lluvia propuesto por

Caine aplicable a cualquier parte del mundo en un intervalo (Caine, 1980), se obtiene umbral de lluvia como detonante de movimientos de masa, representado en la ecuación 5.

$$I = 14.82D^{-0.39}$$

Ecuación 5 Umbral crítico de lluvia

Así, se procede a comparar los datos de precipitaciones y duraciones para diferentes años, con el umbral de Caine, y comprobar si constituyen o no lluvias desencadenantes.

Otra opción para la evaluación del factor detonante por precipitaciones, es mediante la clasificación de Mora Vahrson. Para ello es necesario contar con los valores de lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno de 100 años de la zona de estudio (Mora & Vahrson, 1992). Posteriormente contrastar dichas precipitaciones con la clasificación de valores de lluvias máximas generadoras de susceptibilidad, ver la tabla 7,

Tabla 7 Clasificación de los valores de las lluvias máximas de una duración del día con un período de retorno de 100 años

| Precipitaciones máximas 24 h, Tr 100 años (mm) | Calificativo Susceptibilidad (deslizamientos) | Ponderación |
|--|---|-------------|
| <100 | Muy bajo | 1 |
| 100-200 | Bajo | 2 |
| 200-300 | Mediano | 3 |
| 300-400 | Alto | 4 |
| >400 | Muy alto | 5 |

Fuente: (Mora & Vahrson, 1992) en (Cárdenas & Kabir, 2006)

A continuación, se describe como obtener los valores de lluvia máxima para diferentes duraciones y períodos de retorno, que puedan servir para determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos en la zona objeto de estudio, al contrastarlos con los valores de la tabla 7.

Para ello se debe contar con una serie histórica de precipitaciones máximas, las cuales van a permitir evaluar la probabilidad de excedencia asociada un período de retorno. Mediante la ecuación 7 se determinan si las precipitaciones máximas registradas de cada evento pueden ser excedidas en un período de tiempo.

Dado que la función de distribución de probabilidad $F(x)$ ecuación 6, corresponde a la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número X , entonces el valor de la variable aleatoria de precipitación excedida, está dada por la función complementaria de $F(x)$ ver ecuación 7.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Ecuación 6 Función de distribución de probabilidad

$$P(x > X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T}$$

Ecuación 7 Función complementaria de $F(x)$

Establecida la probabilidad, se determina la cantidad de precipitación asociada a diferentes períodos de retorno aplicando la ley de distribución de Gumbel, la cual calcula la probabilidad que se produzca un evento extraordinario de precipitación intensa a partir de una serie de datos (Gumbel, 1994) en (López, 2015), ver ecuación 8.

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}}$$

Ecuación 8 Función de distribución de Gumbel

Donde x representa el valor a asumir por la variable aleatoria, d y u parámetros y e base de los logaritmos neperianos.

Despejando x de la ecuación 8, se tiene la ecuación 9.

$$x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$$

Ecuación 9 x función de distribución de Gumbel

Siendo los parámetros u y d :

$$u = \bar{x} - 0.450047S$$

$$\frac{1}{d} = 0.779696S$$

\bar{x} = media de la serie de datos considerados y S = desviación típica de la muestra de datos considerados.

Una vez ajustado el registro de las precipitaciones a la función de distribución de Gumbel, se comprueba a través de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov. Este test mide la máxima diferencia entre la frecuencia relativa acumulada con la frecuencia teórica acumulada o función de distribución de Gumbel $F(x)$

La frecuencia relativa acumulada se obtiene ordenando de menor a mayor los datos de precipitación y aplicando la ecuación 10.

$$F_n = \frac{n}{N+1}$$

Ecuación 10 Frecuencia relativa acumulada

Donde F_n es la frecuencia relativa acumulada, n es el número total de orden, y N es el número total de datos.

Una vez determinadas las frecuencias relativas acumuladas F_n , mediante la ecuación 10 y las frecuencias teóricas acumuladas $F(X)$ mediante la ecuación 8, se obtiene el supremo o el valor máximo de la diferencia de ambas, en la i -ésima posición de orden, ver ecuación 12.

$$D = \sup |F_n(x)_i - F(x)_i|$$

Ecuación 11 D supremo

Posteriormente se asume un valor de significancia y considerando el tamaño de muestra, se obtiene la probabilidad de la tabla estadística de Kolmogorov-Smirnov, la cual se compara con el valor obtenido de la ecuación 11, y se realiza el test de bondad de ajuste como:

Si $D < D_{\text{tabla}}$, entonces se acepta H_0 (H_0 : el ajuste es adecuado)

Si $D > D_{\text{tabla}}$, se rechaza H_0 , por tanto, el ajuste no es adecuado con el nivel de significancia asumido.

Adicionalmente se realiza una prueba de bondad de ajuste basada en el coeficiente de determinación (R^2) ecuación 13

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (F_n(x))_i - \overline{F(x)_i})^2}{\sum (F_n(x)_i - \overline{F_n(x)_i})^2} \quad \text{Ecuación 12 Coeficiente de determinación}$$

Donde: R^2 : Coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$ y $\overline{F_n(x)_i}$ es la media de las frecuencias observadas acumuladas.

Así, una vez validado el ajuste de los datos, se determinan los montos de precipitación asociados a cada período de retorno, a través de la ecuación 9. Finalmente se determina la intensidad y duración de la precipitación, mediante la formulación del Ministerio de Fomento (BOE, 2016), presentada en la ecuación 13. Para ello hay que determinar primero la intensidad media diaria de la precipitación, ver ecuación 14 y determinar el factor de intensidad, ver ecuación 16.

$$I(T, t) = I_d \cdot F_{\text{int}} \quad \text{Ecuación 13 Intensidad de precipitación a un período de retorno } T \text{ y una duración } t$$

Donde:

$I(T, t)$ (mm/h) Intensidad de precipitación correspondiente a un período de retorno T y a una duración de aguacero t .

I_d (mm/h) Intensidad media diaria de precipitación corregida correspondiente al período de retorno.

F_{int} Factor de intensidad.

$$I_d = \frac{P_d \cdot K_A}{24} \quad \text{Ecuación 14 Intensidad media diaria de precipitación}$$

Donde P_d (mm) precipitación diaria correspondiente al período de retorno T , K_A es el factor reductor de precipitación por área de la cuenca. El factor K_A , tiene en cuenta la no simultaneidad de la lluvia sobre la superficie o área de la cuenca A , ver ecuación 15.

$$\text{Si } A < 1 \text{ km}^2 \quad K_A = 1$$

$$\text{Si } A \geq 1 \text{ km}^2 \quad K_A = 1 - \frac{\log_{10} A}{15}$$

$$\text{Ecuación 15 Factor reductor de precipitación por área de la cuenca}$$

Para determinar el factor de intensidad F_{int} se toma el mayor valor $F_{\text{int}} = \max(F_a, F_b)$

Donde F_a es un factor obtenido a partir del índice de torrencialidad, ver ecuación 16 y F_b , es el factor obtenido a partir de las curvas IDF de un pluviógrafo próximo, ver ecuación 17.

$$F_a = \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{3,5287 - 2,5287 t^{0,1}}$$

Ecuación 16 Factor F_a

I_1/I_d expresa la relación entre la intensidad de precipitación horaria y la media diaria corregida, su valor se determina en función de la zona geográfica, a partir de la figura 7.

$t(horas)$ Duración del aguacero.

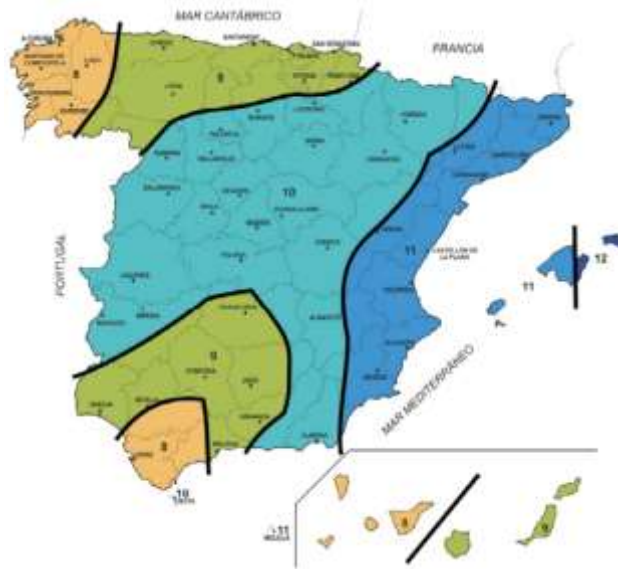


Figura 7 Mapa de Índice de torrencialidad. Fuente (BOE, 2016)

$$F_b = k_b \frac{I_{IDF}(T, t_c)}{I_{IDF}(T, 24)}$$

Ecuación 17 Factor F_b

Donde:

$$k_b = 1.13$$

$I_{IDF}(T, t_c)$ (mm/h) Intensidad de precipitación correspondiente al período de retorno T y al tiempo de concentración t_c , obtenido a través de las curvas IDF del pluviógrafo

$I_{IDF}(T, 24)$ (mm/h) Intensidad de precipitación correspondiente al período de retorno T y a un tiempo de aguacero igual 24 h, obtenido a través de las curvas IDF del pluviógrafo

2.7 Índices morfométricos para la caracterización de la cuenca

La determinación de los parámetros morfométricos es importante pues ayuda a caracterizar las cuencas, en cuanto a la forma, el relieve y la red de drenaje. Además permiten predecir el comportamiento de los cursos de agua y sus posibles variaciones con respecto al régimen hidrológico (Vásquez, Herrera, & Gutierrez, 2014).

A continuación, se describen algunos indicadores o parámetros que definen características de permeabilidad, tiempo y caudal de salida, erosión de las cuencas, entre otras.

Área de la cuenca (A): es probablemente la característica geomorfológica más importante para el diseño. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Apacla, 2010).

Perímetro (P): es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria de aguas topográficas (Gaspari, y otros, 2012).

Longitud (L): viene definida por la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe y el punto situado a mayor distancia topográfica (Ibañez, Moreno, & Gisbert, s.f.).

Densidad de drenaje: se denota como la relación entre la longitud total a lo largo de todos los canales de agua de la cuenca en y la superficie total de la cuenca, ver ecuación 18.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Ecuación 18 Densidad de drenaje

Donde $\sum L_i$ = longitud total de todos los canales de agua (km), A = área (km²)

Cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida es la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. (Gaspari, y otros, 2012)

Jerarquización de la red de drenaje: indica el grado de estructura de la red de drenaje. En general, mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura más definida, y presentará una mayor erosión. (INE, 2004)

Los sistemas de jerarquización más usados son el de (Horton, 1945) Y el de (Strahler, 1952). se diferencian entre sí, pues aplicando Shreve se consideran ordenes aditivos, así la intersección de un segmento de primer orden, con uno de segundo orden crea un tercer orden. Mientras que el método de Strahler no es aditivo, sino que considera en la intersección de dos cauces, el orden mayor de ellos y lo asigna.

Una vez jerarquizada la red de drenaje, puede contabilizarse el número de segmentos de cauce de cada orden y calcularse la razón de bifurcación (R_b) presentada en la ecuación 19. R_b está definida como la relación existente entre el número de segmentos de cauce de un orden dado y el número de segmentos de cauce del orden inmediatamente superior.

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Ecuación 19 Razón de bifurcación

Donde R_b = Razón de bifurcación, N_u = número de cauces, N_{u+1} = número de cauces del orden inmediatamente superior.

La media de los R_b se toma como valor representativo de la cuenca. Los valores de R_b mayores de 4 indican una torrencialidad moderadamente alta (Strahler, 1988). No obstante, la comparación sólo es representativa entre cuencas o subcuencas que tengan el mismo orden.

Tiempo de concentración: corresponde al tiempo que toma una partícula de agua en recorrer la distancia entre el punto más alejado del exutorio y éste. Teméz plantea la ecuación 20 para su determinación (Elmes, 2006).

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76} \quad \text{Ecuación 20 Tiempo de concentración}$$

Donde t_c : Tiempo de concentración (horas), L: Longitud del cauce principal (km), J: Pendiente del cauce principal (m/m) dada por H/L, A: Área de la cuenca (km²), H: Diferencia de alturas (m).

Índice de Compacidad de Gravelius (Kc): compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Kc se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parteaguas que la encierra y el perímetro de la circunferencia (Alfonso, 2004), y se encuentra representada en la ecuación 21.

$$k = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación 21 Índice de compacidad}$$

Donde K= Coeficiente de compacidad, P = Perímetro de la cuenca (Km) y A = Área de la cuenca. (Km²)

El grado de aproximación de Kc a la unidad indica la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuando más cercano 1, lo cual quiere decir que entre más bajo sea Kc mayor será la concentración de agua. (Anaya, 2012)

Pendiente media del cauce principal: es el desnivel entre los puntos más elevado y más bajo del río entre la longitud del mismo cauce. A mayor pendiente es mayor la velocidad de desplazamiento del agua, y, por tanto, menor el tiempo de concentración y menor la infiltración

Pendiente media de la cuenca: variación de la inclinación de la cuenca. Define el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de capas de suelo, pues zonas de alta pendiente son más frecuentes los problemas de erosión, y en zonas planas generalmente se presentan problemas de drenaje y sedimentación. (Reyes, Ulises, & Carvajal, 2010)

3. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la comunidad de Madrid España, ver figura 9, en el centro peninsular, entre las provincias de Ávila, Segovia, Guadalajara, Cuenca y Toledo. Donde predominan los climas mediterráneos, cuyos principales rasgos son la estacionalidad de las temperaturas, la sequía estival y la irregularidad de las precipitaciones. (Madrid, s.f.)

La comunidad de Madrid está comprendida en la cuenca hidrográfica del río Tajo. Así, la red hidrográfica madrileña es tributaria del río Tajo por su margen derecha, y está compuesta por los ríos Jarama, Guadarrama y Alberche como afluentes principales, contando cada uno con sus subafluentes. (Madrid, s.f.)

La zona de estudio donde se modela la subcuenca se encuentra al norte, entre los municipios de Valdemorillo, al este con Villanueva de la Cañada, al sur con Brunete y Quijorna y al oeste con

Navalagamella , los cuales se encuentran a una altitud de 815 m, 652 m, 656 m, 576 m y 753 m respectivamente según la Consejería de Medio Ambiente, Administración Local y Ordenación del Territorio. ver figura 10.

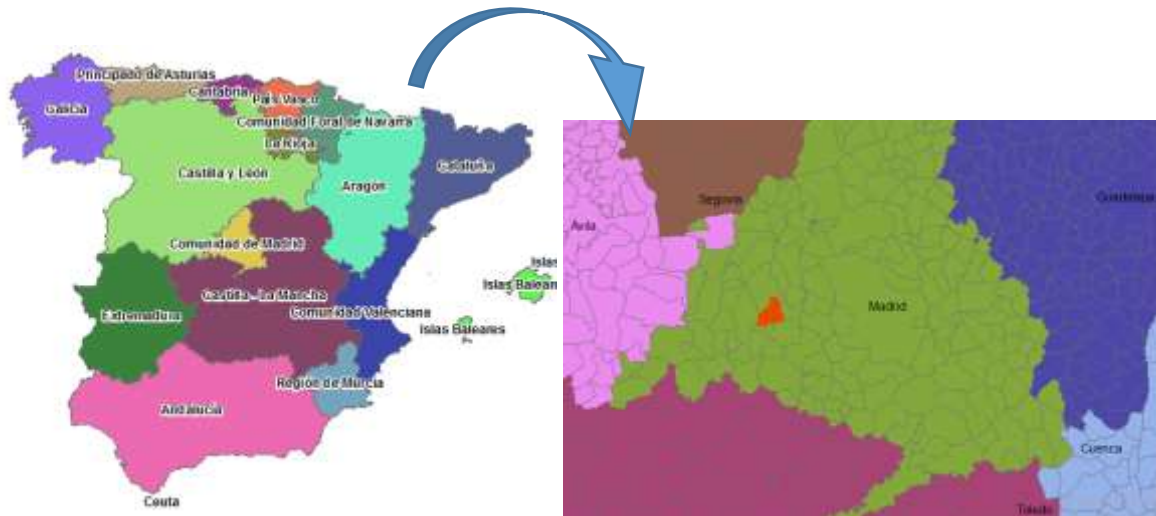


Figura 8 Zona de estudio en la comunidad de Madrid



Figura 9 Municipios pertenecientes a la subcuenca

4. METODOLOGÍA

Para determinar la susceptibilidad ante movimientos en masa se plantea seguir la metodología de la figura 11, en donde primero se lleva a cabo una revisión bibliográfica y posteriormente se recopilan los datos necesarios para el desarrollo del trabajo como: el MDT, mapas de uso de suelo, geológico y litológico de la zona objeto de estudio y la obtención de datos de estaciones meteorológicas que intervienen en el sector, además de la API de leaflet.

Teniendo la información espacial de partida, se lleva a cabo el modelamiento. Primero se procede a la delimitación de la subcuenca y la obtención de la red de drenaje a partir del MDT, posteriormente a la elaboración de la cartografía de las variables condicionantes como: coberturas, litología, estructuras y pendientes ajustadas a la subcuenca y a la clasificación de dichas capas a una escala en común. Luego se realiza la matriz jerarquizada de las variables, se normaliza y una vez aprobado el nivel de consistencia se obtienen los pesos o influencias de cada variable ante fenómenos de movimientos en masa. Finalmente se realiza la evaluación multicriterio mediante la superposición ponderada (multiplicando cada capa por su respectivo peso y luego sumándolas entre sí) para la obtención del mapa de susceptibilidad. Y teniendo esta capa resultante, junto a las capas de entrada y las clasificadas, se realiza la transformación a formato JSON, las cuales se importan a la API de leaflet para la creación de la aplicación web.

Adicionalmente mediante los datos de estaciones meteorológicas se realiza el estudio del factor detonante de las precipitaciones máximas en 24 horas para un período de retorno de 100 años que puedan servir para posteriores estudios de peligrosidad en la subcuenca.

4.1 Revisión de información bibliográfica

La evaluación de áreas susceptibles a deslizamiento fue desarrollada por primera vez, por Brabb en San Mateo County (California), para el United States Geological Survey (USGS) en 1978. Y en 1988, se inició el uso de Sistemas de Información Geográfica para la elaboración de los mapas de susceptibilidad (Navarro, 2012). En los años 90, se produce un mayor desarrollo de las capacidades de los SIG, por lo que se incrementan las aplicaciones sobre el análisis de susceptibilidad a los deslizamientos (Carraca, Cardinali, & Guzzetti, 1992), usando técnicas basadas en la superposición de mapas, y luego con el Modelo Digital del Terreno (MDT) se consigue extraer características morfológicas e hidrológicas que sirven como parámetros para realizar el estudio de susceptibilidad.

Entre ciertos estudios relacionados a la evaluación de susceptibilidad ante movimientos de ladera a través de los SIG se tiene el caso de fallas de taludes en Centroamérica, en donde se propone un método de predicción de amenaza por dicho fenómeno, que incluye factores intrínsecos o de susceptibilidad (relieve, condiciones litológicas y humedad) y factores externos o detonantes (actividad sísmica y la precipitación) para calcular el nivel de amenaza como el producto de la susceptibilidad por el detonante (Mora & Vahrson, 1992).

Otras metodologías estudiadas para el cálculo de la susceptibilidad, es a través del análisis de frecuencias de deslizamientos de laderas registrados y de susceptibilidad mediante evaluación multicriterio (Navarro, 2012), o la implementación de modelos de evaluación multicriterio en donde se procesa la información en un SIG, dando peso a los factores intrínsecos mediante una matriz de jerarquización, que combinados a los factores desencadenantes, generan el mapa de susceptibilidad (Abril, 2011). También se realiza la evaluación de la susceptibilidad y amenazas por deslizamientos mediante datos e imágenes satélites de LANDSAT ETM, y posterior al procesamiento, la aplicación del método de evaluación multicriterio (Roa, 2007).

Estos estudios de susceptibilidad proporcionan una amplia visión de las metodologías usadas, para poder implementar y ajustar al presente trabajo, de acuerdo a las características y extensión propia de la zona, a la escala de trabajo y a la disponibilidad de datos que se tienen.

4.2 Captura de datos

Para la elaboración del estudio, se hace uso de la siguiente información:

- ✓ Mapa geológico de España Hoja 558 Majadahonda (litología y unidades estructurales) en formato shapefile a escala 1:50000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, s.f.)
- ✓ Mapa Corine Land Cover Hoja 558 en formato shapefile del Instituto Geográfico Nacional IGN – Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)
- ✓ Modelo Digital del terreno MDT Hoja 558 en formato ráster a escala 1:100000 del Instituto Geográfico Nacional IGN – Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)
- ✓ Mapa Topográfico Nacional MTN en formato raster, Hoja 558 escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional IGN – Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)
- ✓ Datos meteorológicos de precipitaciones (1985-2012) del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid
- ✓ Capa geográfica en formato shapefile con la geometría de los términos municipales de España, sistema de referencia ETRS_1989_UTM_Zone_30N de ESRI.

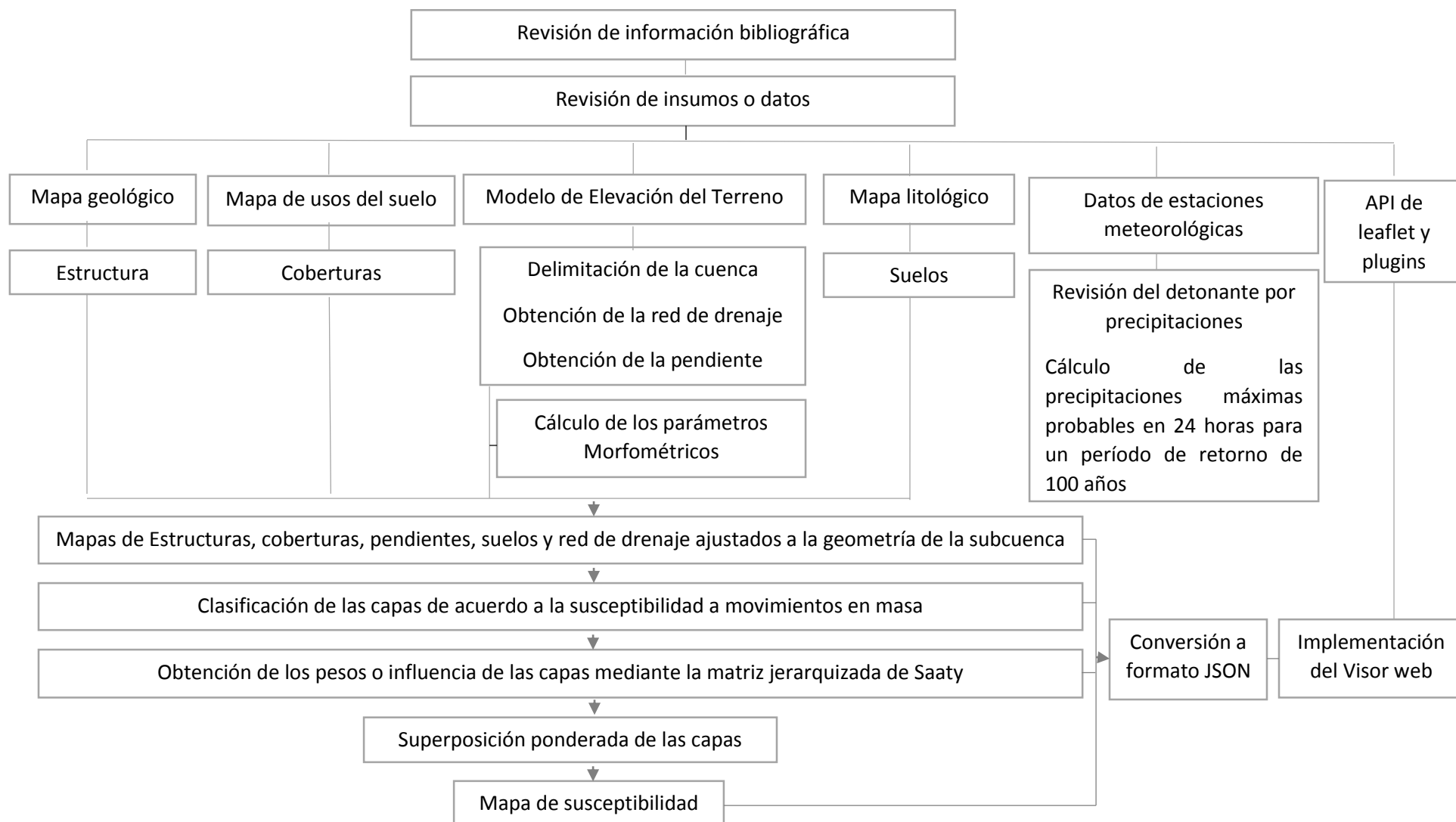


Figura 10 Metodología de estudio

4.3 Delimitación de la subcuenca y análisis de parámetros morfométricos

Para la delimitación de la cuenca se hace uso de las herramientas *Hydrology*, *Arc Hydro Tools* de *Spatial Analyst* y *Model Builder*. *Hydrology* presenta herramientas de modelado hidrológico, las cuales permiten identificar sumideros, determinar direcciones de flujo, calcular acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de drenaje. *Arc Hydro Tools* permite delinear y caracterizar cuencas en formato ráster y vector, definir y analizar redes hídricas, administrar datos de series de tiempo, entre otros.

Las herramientas de *Hydrology*, *Arc Hydro Tools* y otras de geoprocetamiento, se incorporan en el lenguaje de programación visual de *Model Builder*, para automatizar, administrar y modificar el flujo de procesos. Debido a la complejidad y extensión del flujo de trabajo se presenta el modelo en el anexo 15. Sin embargo, en la figura 12 se encuentran los pasos para la modelación de la subcuenca y en la figura 13 el producto o resultado del modelo, el cual es la delineación de la subcuenca y determinación de la red de drenaje.

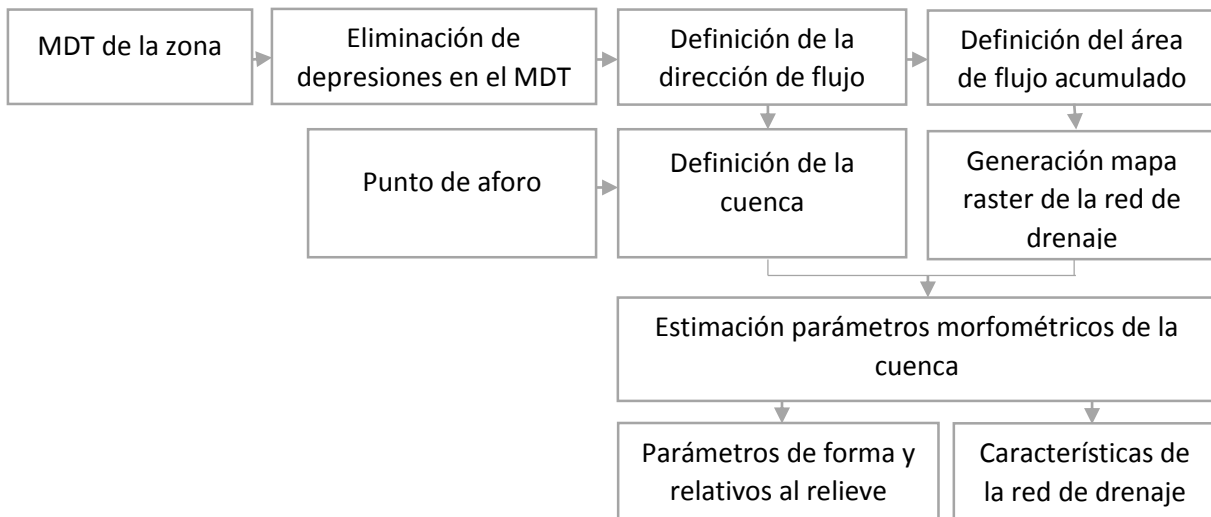


Figura 11 Delimitación y caracterización de la cuenca

La modelación de la subcuenca parte de un MDT de la zona de estudio, posteriormente se minimizan las depresiones y picos anómalos, los cuales pueden ser de origen natural o del relieve, pero a menudo son debido a errores en el proceso de generación del MDT. Luego se determina la dirección de flujo de cada pixel, según la elevación de los pixeles vecinos, buscando el camino descendente de un pixel a otro. Una vez establecida la dirección de flujo y teniendo un punto de aforo, se pueden calcular variables hidrológicas como el área de drenaje y la delineación de subcuenca. Posteriormente se determina la acumulación del flujo de todos los pixeles que fluyen en cada celda de pendiente descendente, y con la cual se genera la red hídrica.

Una vez delimitada la subcuenca y determinada la red de drenaje, se procede a calcular los parámetros morfométricos relativos al relieve y a la red de drenaje, mediante herramientas de geoprocetado como la calculadora de campos. En la tabla 8 se presenta un resumen de los cálculos obtenidos.

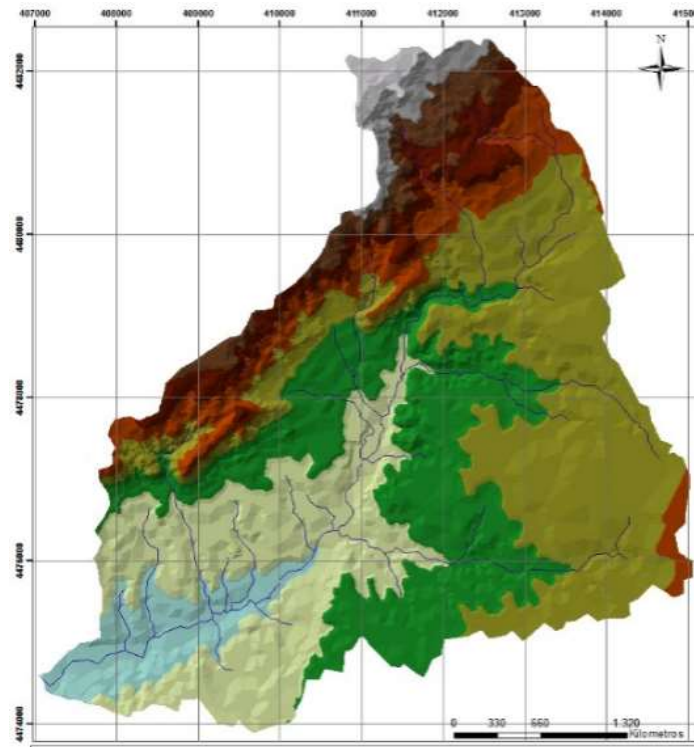


Figura 12 Subcuenca Arroyo de Quijorna

Tabla 8 Resumen parámetros morfométricos de la subcuenca Arroyo de Quijorna

| Cuenca | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Área de la cuenca | 37,97km ² |
| Perímetro de la cuenca | 32,45 km |
| Cota mínima | 530 m |
| Cota máxima | 820 m |
| Índice de compacidad | 1,48 |
| Cauces | |
| Longitud del cauce principal | 15,20 km |
| Longitud del drenaje total | 46,86 km |
| Cota mínima | 527 m |
| Cota máxima | 803 m |
| Pendiente media del cauce principal | 1,82 % |
| Densidad de drenaje | 1,23 km/ km ² |
| Tiempo de concentración | 5.08 horas |
| Razón de bifurcación | 3.40 |

El cálculo de estos parámetros es importante, pues aporta información sobre la caracterización de la subcuenca y el funcionamiento hidrológico de ésta. A continuación, se presenta una descripción de los resultados obtenidos:

- El conocimiento del parámetro del área y perímetro permiten el cálculo de otras variables morfométricas. Además, el tamaño de la cuenca se vincula con la cantidad de

precipitación que ésta puede recoger. Así, en cuencas grandes se tiende a recoger mayor cantidad de precipitación que en las pequeñas, por lo que, en las primeras, las crecidas tienden a ser más voluminosas. (González A. , 2004)

La cuenca del arroyo de Quijorna tiene un perímetro de 32.4 km y un área de 37,97 km², por lo que se considera una cuenca pequeña según la clasificación de la tabla 9. En estas cuencas, la cantidad y distribución del escurrimiento es influenciada principalmente por las condiciones físicas del suelo y cobertura, mientras que en las cuencas grandes se presta más atención a la hidrología del cauce principal. Además, una cuenca pequeña es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración (Chow & Mays, 1977)

Tabla 9 Clasificación de área propuesta para las cuencas

| Tamaño de la cuenca (km ²) | Descripción |
|--|--------------------|
| <25 | Muy pequeña |
| 25-250 | Pequeña |
| 250-500 | Intermedia-pequeña |
| 500-2500 | Intermedia-grande |
| 2500-5000 | Grande |
| >5000 | Muy grande |

(Campos, 1992)

- El orden de las corrientes refleja el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Esta cuenca de estudio presenta hasta orden 4, representada en la figura 14. De acuerdo a los resultados de tabla 10, la razón de bifurcación de la cuenca es 3.4, y de acuerdo con los estudios de Campos, las razones de bifurcación varían entre 3.0 y 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje, y valores superiores a 4 indican una torrencialidad moderadamente alta (Campos, 1992) .

Tabla 10 Razón de bifurcación de la Subcuenca Arroyo de Quijorna

| Número de orden | Número de cauces | Rb | Rb medio |
|-----------------|------------------|------|----------|
| 1 | 32 | | 3.4 |
| | | 2.13 | |
| 2 | 15 | | |
| | | 1.07 | |
| 3 | 14 | | |
| | | 7 | |
| 4 | 2 | | |

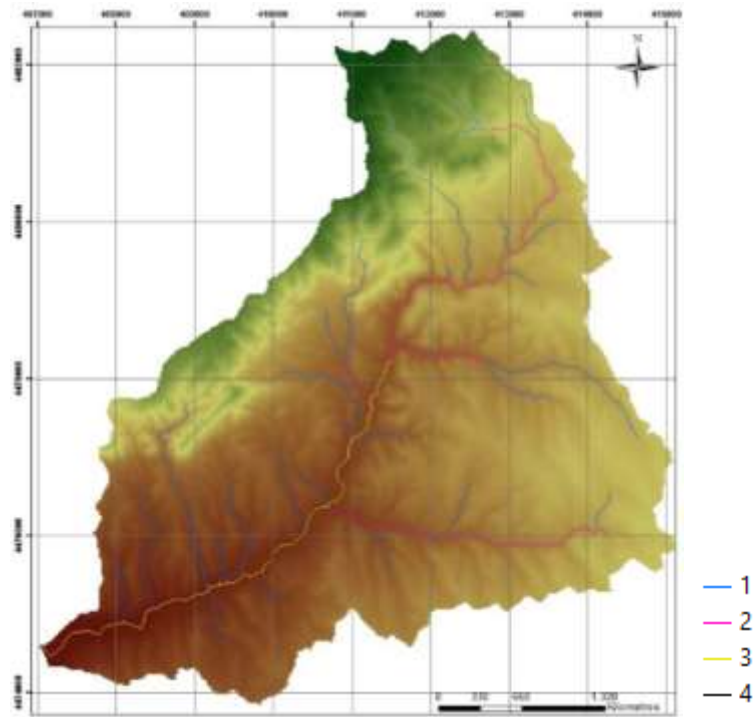


Figura 13 Jerarquía de red Strahler subcuenca arroyo de Quijorna

- La densidad de drenaje en la subcuenca es de 1.23, contabilizada en un rango de valores que van desde valores inferiores a 1 hasta valores superiores a 3 km/km², representando cuencas pobremente drenadas hasta cuencas excepcionalmente bien drenadas (Hernández, 2006) en (Viramontes, y otros, 2008), Por lo tanto se tiene una subcuenca moderadamente drenada según la tabla 11.
- Las bajas densidades de drenaje se presentan en regiones de rocas persistentes o de suelos muy permeables con vegetación densa y donde el relieve es débil. Mientras que se tienen altas densidades de drenaje en áreas de rocas débiles o de suelos impermeables, con vegetación escasa y relieve montañoso (Campos, 1992). Además, en altas densidades de drenaje se tiene una rápida respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

Tabla 11 Valores interpretativos de la red de drenaje

| Densidad de drenaje (km/km ²) | Categoría |
|---|-----------|
| <1 | Baja |
| 1-2 | Moderada |
| 2-3 | Alta |
| >3 | Muy alta |

Fuente: (Delgadillo & Paez, 2008)

- La longitud del cauce principal influye en el tiempo de concentración y tiene un efecto importante en la respuesta hidrológica de la cuenca. Pues en una longitud corta, los efectos de la precipitación se hacen sentir más rápidamente que en un río largo (Campos, 1992), mientras que una longitud larga supone mayores tiempos de desplazamiento de las crecidas. La cuenca de estudio tiene una longitud de cauce principal de 15.2 km, lo cual representa un cauce largo según el estudio morfométrico del parque nacional Pico de Tancítaro (INE, 2004).

Además, el cauce principal presenta una pendiente media de 1.82% caracterizada según la tabla 12 por terrenos de relieve plano. Dicha pendiente se relaciona con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con la capacidad para el transporte de sedimentos, entonces a mayor pendiente, menor es el tiempo de concentración de agua de escorrentía en la red de drenaje.

Tabla 12 Valores para relieve o topografía del terreno

| Pendiente (%) | Tipo de terreno |
|---------------|-------------------------|
| 2 | Llano |
| 5 | Suave |
| 10 | Accidente medio |
| 15 | Accidentado |
| 25 | Fuertemente accidentado |
| 50 | Escarpado |
| Mayor a 50 | Muy escarpado |

(Campos, 1992)

- El tiempo de concentración de la cuenca es de 5 horas y este valor es importante en los modelos de lluvia – escorrentía ya que representa el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que se alcance el caudal máximo con una intensidad de escorrentía constante (SAGARPA, 2012). Es en ese tiempo (5 horas) cuando la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía.
- El índice de compacidad cercano a la unidad, considera que la cuenca tiene una forma redonda e indica la tendencia a concentrar mayor volumen de escurrimiento, por tanto, tiene mayor posibilidad de producir avenidas superiores debido a su simetría. Esto se debe a que, al ser una cuenca compacta, las distancias del trayecto son similares y la escorrentía llega al cauce principal al mismo tiempo.

Para la cuenca se tiene un valor de 1.48 la cual de acuerdo a la tabla 13 representa una cuenca de forma alargada, donde al agua se le dificulta más circular desde la parte alta de la cuenca hasta el final. (Ibisate, 2004)

Tabla 13 índice de Gravelius

| Clase | Rango | Descripción |
|-------|------------|--|
| Kc1 | 1 a 1,25 | Forma casi redonda a oval - redonda |
| Kc2 | 1,25 a 1,5 | Forma oval - redonda a oval - alargada |

| | | |
|-----|------------|----------------------------------|
| Kc3 | 1,5 a 1,75 | Forma oval – alargada a alargada |
|-----|------------|----------------------------------|

Fuente: (Anaya, 2012)

4.4 Determinación de los factores condicionantes

Una vez realizada la delimitación de la subcuenca, la red de drenaje y su caracterización, se lleva a cabo la determinación espacial de los factores condicionantes como la pendiente, la litología, cercanía a estructuras lineales, usos del suelo y cercanía a cursos de agua de la subcuenca, y posteriormente se reclasifican las capas de acuerdo a la susceptibilidad de 1 a 5 (de muy baja a muy alta susceptibilidad). Estos procesos se incorporan mediante flujos de trabajo en *model builder* presentados en el anexo 16.

4.4.1 Pendiente

Después de calcular la pendiente en porcentaje de la subcuenca de Arroyo de Quijorna, se puede observar que se presentan pendientes desde 0° al este de la subcuenca, hasta 27.5° en el oeste, reflejado en la figura 15. Posteriormente se reclasifican las pendientes de 1 a 5 de acuerdo al umbral de la tabla 6. Dicha reclasificación de susceptibilidad se representa en la figura 16.

En la zona de estudio predominan las pendientes suaves (50% del área) y moderadas (22% del área), las cuales representan baja susceptibilidad a fenómenos de deslizamiento. Las pendientes fuertes y muy fuertes representan un 15 % y 1% del área respectivamente y se localizan hacia la parte oeste de la cuenca, y presentan mayor susceptibilidad debido a que pueden producir erosiones intensivas y movimientos de masa, ver gráfico 1 o tabla 14.

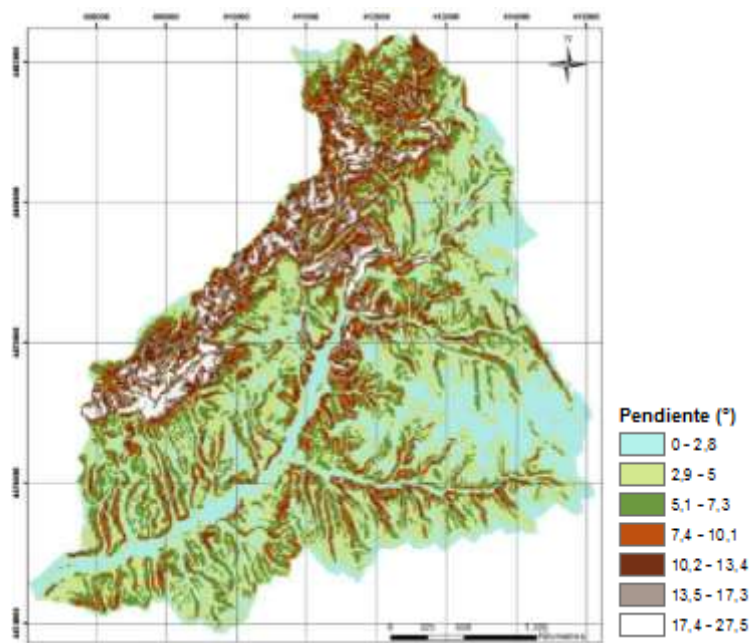


Figura 14 Pendientes subcuenca

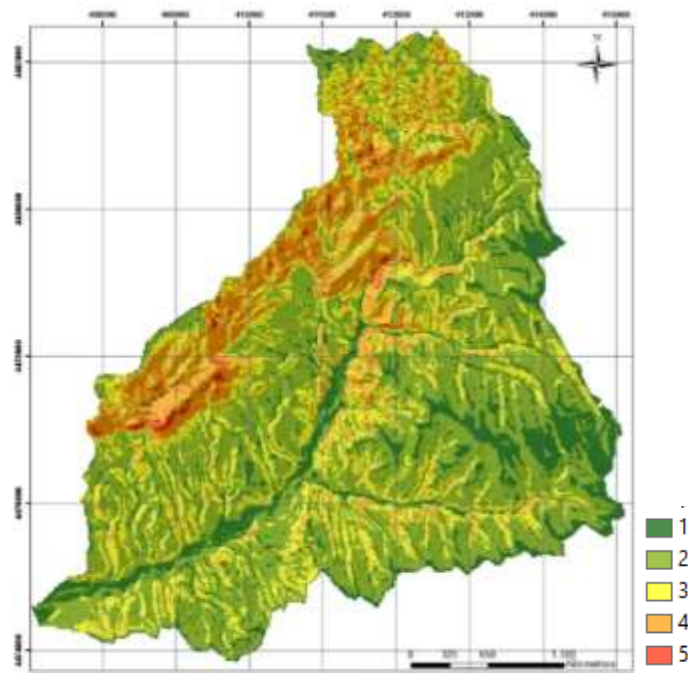


Figura 15 Pendientes reclasificadas de la subcuenca

Tabla 14 Área de susceptibilidad de pendientes

| Susceptibilidad | Clase de pendiente | Área (km2) |
|-----------------|--------------------|------------|
| 1 | Horizontal | 4.62 |
| 2 | Suave | 19.06 |
| 3 | Moderada | 8.39 |
| 4 | Fuerte | 5.61 |
| 5 | Muy fuerte | 0.27 |

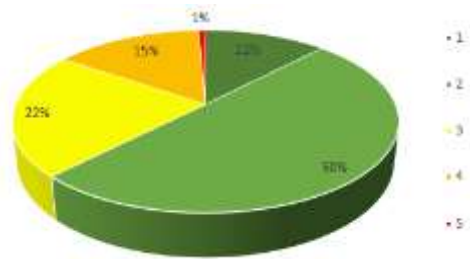


Gráfico 1 Porcentaje área de susceptibilidad de pendientes

4.4.2 Litología

Los desprendimientos de masa se generan principalmente en materiales poco consolidados. Siendo las zonas más propensas a deslizamientos las que se encuentran caracterizadas por la presencia de materiales areno-arcillosos y/o yesíferos (IGME, s.f.),

La litología de la subcuenca representada en la figura 17, se caracteriza en gran parte (51% de la cuenca) de arcosas y fangos arcosos, seguida de arcosas y bloques (11% de la cuenca) hacia la parte este de la cuenca, según lo indicado en el gráfico 2. Estos tipos de suelo pueden ser desde

productos de alteración que ha sufrido un mínimo transporte, a areniscas muy bien ordenadas y con estratificaciones cruzadas que han sufrido un transporte importante. (Alonso, 2010). Siendo las areniscas, sedimentos arenosos poco consolidados, con poca cementación, lo cual les hace erosionables a agentes atmosféricos (Díaz E. , 2005).

Las rocas de diques representan un 0.6% del área, y son estructuras sedimentarias de textura parecida a una roca intrusiva o una roca volcánica (Díaz E. , 2005). Las rocas duras constituidas por rocas ígneas y metamórficas (granitoides, gneises, pizarras, cuarcitas...) constituyen un 11% del área, y se encuentran hacia la parte oeste de la cuenca. Las cuales se pueden considerar en conjunto impermeables por porosidad, pero la presencia de fracturas (diaclasas y fallas) y de zonas de arenización posibilita la existencia de agua en el subsuelo en determinadas zonas (Díez, 2001).

Dentro de los granitoides se encuentran los granitos, leucogranitos, adamellitas entre otros. Las adamellitas se encuentran en un 0.2% del área. Éstas contienen una textura de grano grueso a medio, y se encuentran frecuentemente afectas por diaclasas, además meteorizan más fácilmente que los leucogranitos, dando lugar a un material suelto de aspecto arenoso (Urquí & Salazar, 2009). Es así que los leucogranitos presentan mayor resistencia a la erosión.

Los esquistos se encuentran en un 3% del área de la subcuenca, los cuales representan rocas metamórficas que se componen de cristales planos que se alinean, de tal manera que las rocas se rompen con facilidad en fragmentos planos. Son así, materiales muy inestables en los taludes, debido a su microestructura y a la facilidad con la que se meteoriza (Suarez, 1998).

La silicificación es la consecuencia del reemplazamiento, que da origen a rocas de sílice con morfología de nódulos y cuerpos irregulares que aparecen incluidos en las rocas reemplazadas o encajonantes (Bustillo, Jiménez, & Bustillo, 2012). Las rocas cementadas por las variedades de sílice suelen presentar alta resistencia a la deformación (rocas duras y resistentes a los procesos de alteración), siempre que todos los poros estén rellenos y no exista una matriz fina de carácter arcilloso (ugr, 2012).

Las rocas detríticas están constituidas por partículas o clastos de diferentes tamaños (bloques, cantos, gravas, arenas, limos, arcillas). Los materiales poco cementados, con tamaños de grano fino (limo-arcilla o arenas limo-arcillosas), o de un amplio rango granulométrico (derrubios de ladera) son las litologías más propensas a deslizamientos.

Los suelos aluviales, compuestos por arcilla tienden a ser blandos y los de arena tienden a ser sueltos. Debido a su poca cementación, los materiales aluviales son propensos a erosión y deslizamientos (Suarez, 1998).

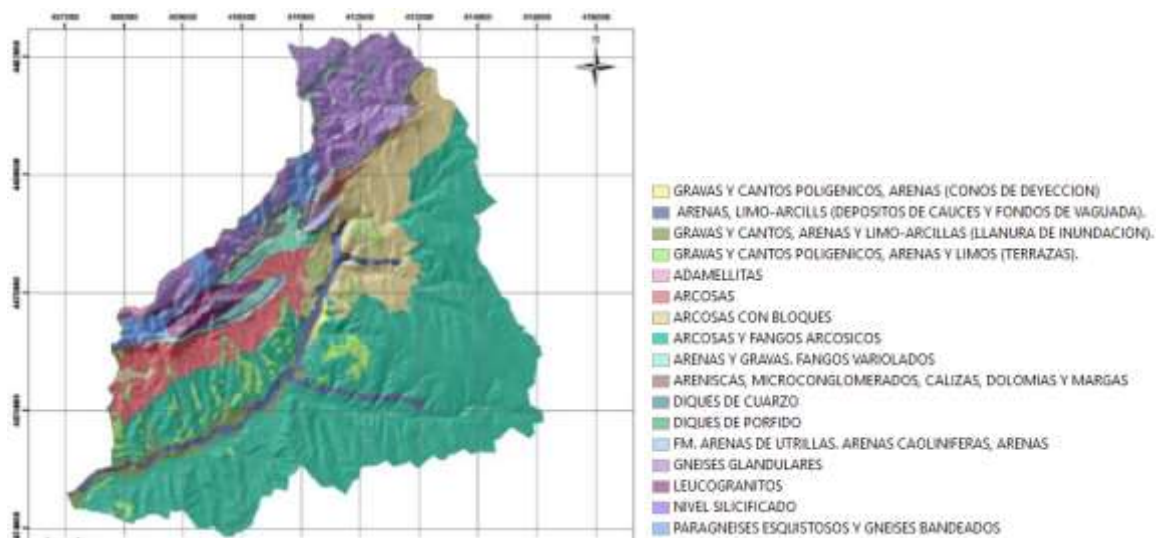


Figura 16 Litología Subcuenca

Tabla 15 Área de los tipos de suelo en la subcuenca

| FID | Litología | Área (km ²) |
|-----|--|-------------------------|
| 0 | Gravas y cantos poligenicos, arenas (Conos de deyección). | 0.115 |
| 1 | Arenas, limo-arcilla (Depósitos de cauces y fondos de vaguada) | 1.26 |
| 2 | Gravas y cantos, arenas y limo-arcilla (Llanura de inundación) | 0.680 |
| 3 | Gravas y cantos poligenicos, arenas y limos (Terrazas). | 1.54 |
| 4 | Adamellitas | 0.0595 |
| 5 | Arcosas | 2.61 |
| 6 | Arcosas con bloques | 4.26 |
| 7 | Arcosas y fangos arcosicos | 19.2 |
| 8 | Arenas y gravas. fangos variolados | 0.984 |
| 9 | Areniscas, microconglomerados, calizas, dolomias y margas | 0.525 |
| 10 | Diques de cuarzo | 0.119 |
| 11 | Diques de pórfido | 0.113 |
| 12 | FM. arenas de utrillas. arenas caoliníferas, arenas | 0.297 |
| 13 | Gneises glandulares | 4.11 |
| 14 | Leucogranitos | 0.753 |
| 15 | Nivel silicificado | 0.107 |
| 16 | Paragneises esquistosos y gneises bandeados | 1.18 |

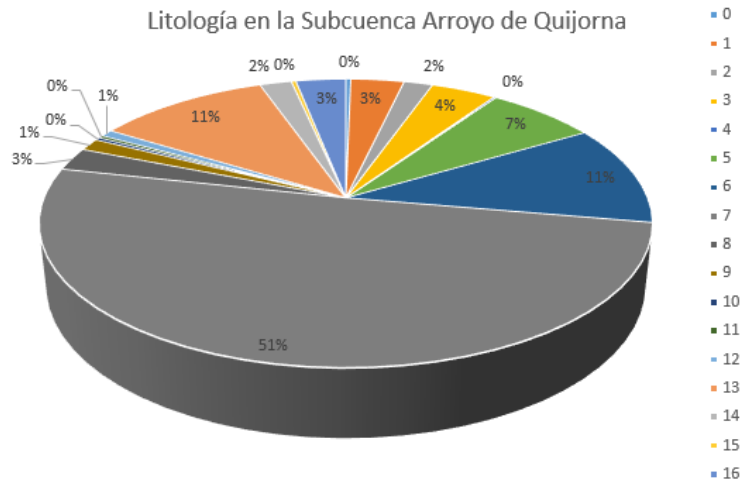


Gráfico 2 Porcentaje del área de los tipos de suelo en la subcuenca

Posteriormente y de acuerdo al tipo de litología presente en la subcuenca, se realiza la clasificación de la susceptibilidad de acuerdo a la tabla 5, donde los materiales arenosos y depósitos aluviales representan la susceptibilidad más alta. El resultado de la clasificación de cada material ante fenómenos de movimientos en masa, se encuentra representado en la figura 18.

Se observa que la susceptibilidad litológica a movimientos de masa es moderada en un 51% del área, encontrándose localizada principalmente al sureste de la cuenca, un 35% del área se encuentra con susceptibilidad media y un 6% del área en susceptibilidad muy alta, hacía el oeste de la subcuenca, de acuerdo al gráfico 3 o tabla 16.

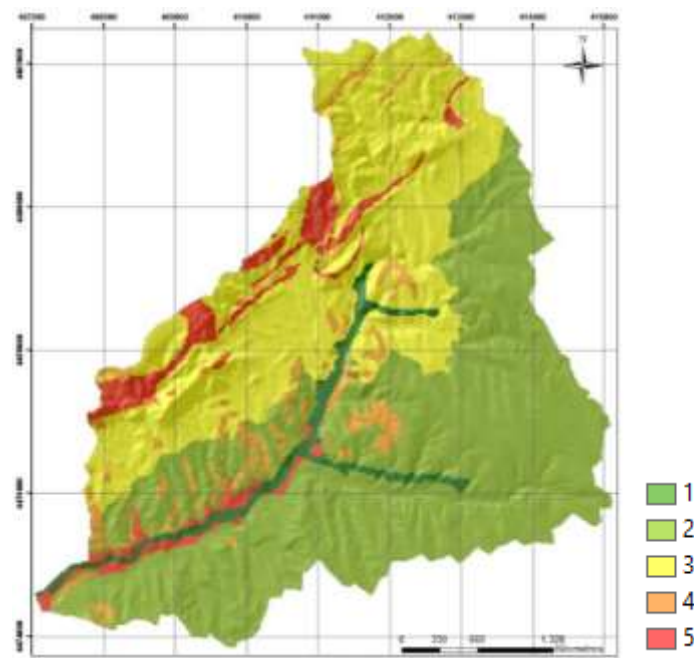


Figura 17 Litología reclasificada de la subcuenca

Tabla 16 Área de la susceptibilidad litológica

| Susceptibilidad | Área (km ²) |
|-----------------|-------------------------|
| 1 | 1.289 |
| 2 | 19.29 |
| 3 | 13.15 |
| 4 | 1.878 |
| 5 | 2.364 |

de la subcuenca

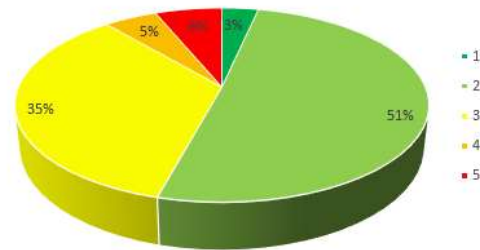


Gráfico 3 Porcentaje área de susceptibilidad de la litología

4.4.3 Estructuras lineales

La geología de la zona de estudio, está caracterizada por la presencia de fallas conocidas, inversas, supuestas y de movimiento levógiro según la figura 19. Estas fallas se encuentran asociadas a zonas de fractura y fuertes anomalías del relieve. Y son importantes, pues cuando se excede la resistencia de corte del material los movimientos de masa pueden ocurrir (Elmes M. , 2006).

Los deslizamientos generalmente son controlados por planos de debilidad como las fallas, superficies entre estratos o contactos entre la roca y los flujos de barro se presentan en morfologías empinadas en rocas de fallas o fracturas, con escasa cobertura de vegetación y en condiciones abundantes de intensas lluvias.

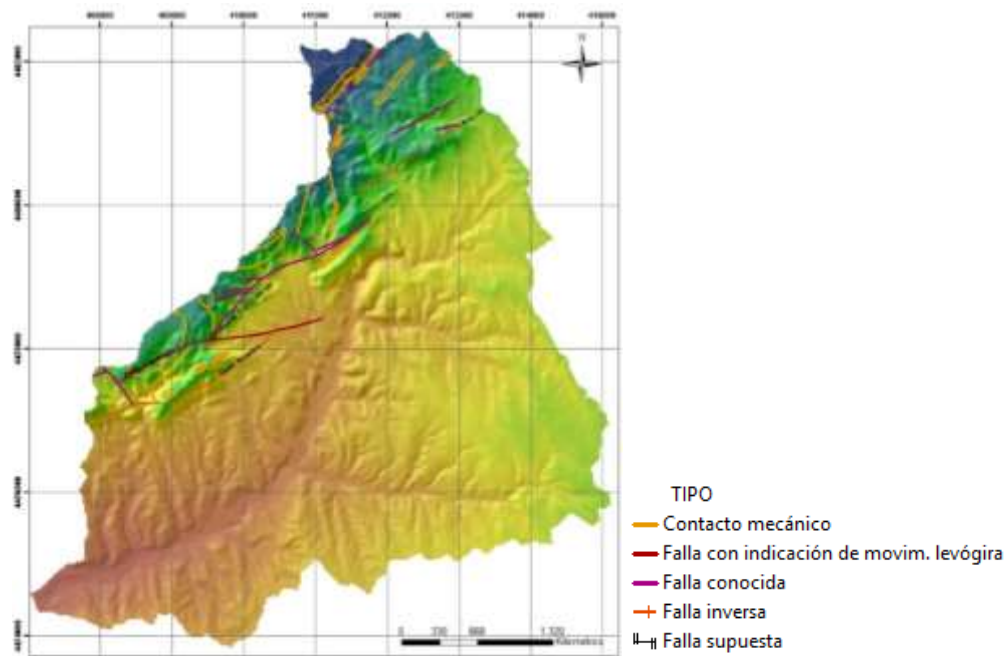


Figura 18 Estructuras tectónicas de la subcuenca

Así, teniendo en cuenta las estructuras lineales presentes en la subcuenca, se calcula la distancia desde cada celda a las diferentes estructuras geológicas, con la finalidad de considerar el efecto de las fallas en la cuenca, ver figura 20. Asignando el valor más alto de susceptibilidad a las zonas que

están aledañas a la falla, consideradas las más inestables a movimientos en masa debido a su proximidad. De acuerdo al gráfico 4 o tabla 17, el 69% del área presenta muy baja susceptibilidad hacia el este de la cuenca, y el 14% del área una muy alta susceptibilidad hacia el oeste.

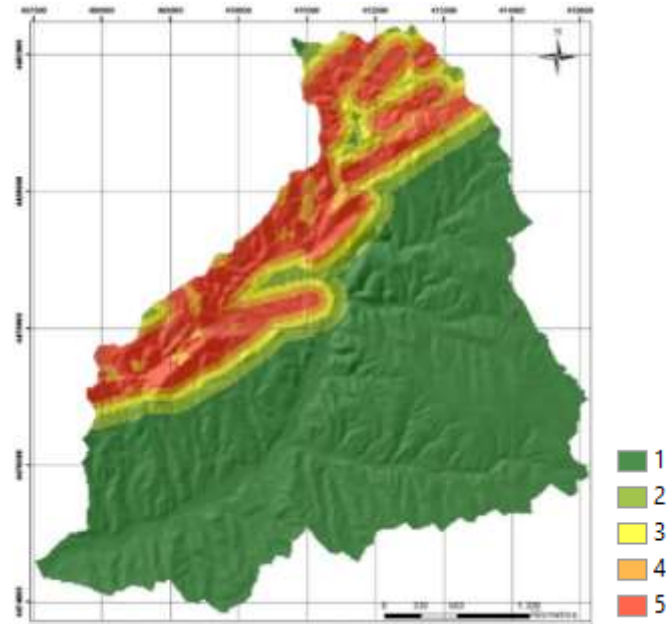


Figura 19 Distancia a estructuras tectónicas en la subcuenca

Tabla 17 Áreas de influencia de las estructuras

| Susceptibilidad | Área (km ²) |
|-----------------|-------------------------|
| 1 | 25.97 |
| 2 | 1.966 |
| 3 | 1.822 |
| 4 | 2.785 |
| 5 | 5.425 |

susceptibilidad de

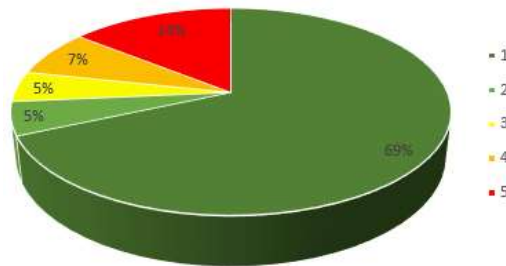


Gráfico 4 Porcentaje del área de influencia de susceptibilidad de las estructuras

4.4.3 Usos del suelo

La clasificación de los usos del suelo de la zona objeto de estudio se encuentra representada en la figura 21 y es importante, ya que la cobertura es un factor que regula el régimen hidrológico, controlando la infiltración y escorrentía superficial, y protegiendo el suelo contra la erosión.

En las zonas que presentan escasa vegetación, como en suelos desnudos o deforestados, se aumenta la escorrentía superficial y se intensifica la erosión. Pues conforme aumenta la intensidad y duración de la precipitación, al no contar con una cobertura de interceptación y

amortiguamiento, mayor es la tasa de erosión y el grado de saturación del suelo, incrementando la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

En la subcuenca los bosques de frondosas o de hojas anchas, dominados por angiospermas representan el 11.4% del área. Las tierras en labor de secano, o sistemas de cultivos donde el aporte de agua depende exclusivamente de las precipitaciones atmosféricas son las que predominan en la mayor parte de la cuenca con un 39.4% del área. Los cultivos con prácticas de conservación del suelo (sistemas agroforestales) se encuentran en un 7.8% del área. La vegetación esclerófila, la cual tiene predominio de arbustos con hojas pequeñas el 8.1%, las praderas y pastizales el 22.1% y los matorrales el 3.5% del área. Por último, en la subcuenca el tejido urbano representa un 7.7 % del área, encontrándose al norte (urbanización de El Mirador del Romero,) sureste (Villanueva de la Cañada) y suroeste (Quijorna). ver gráfico 5.

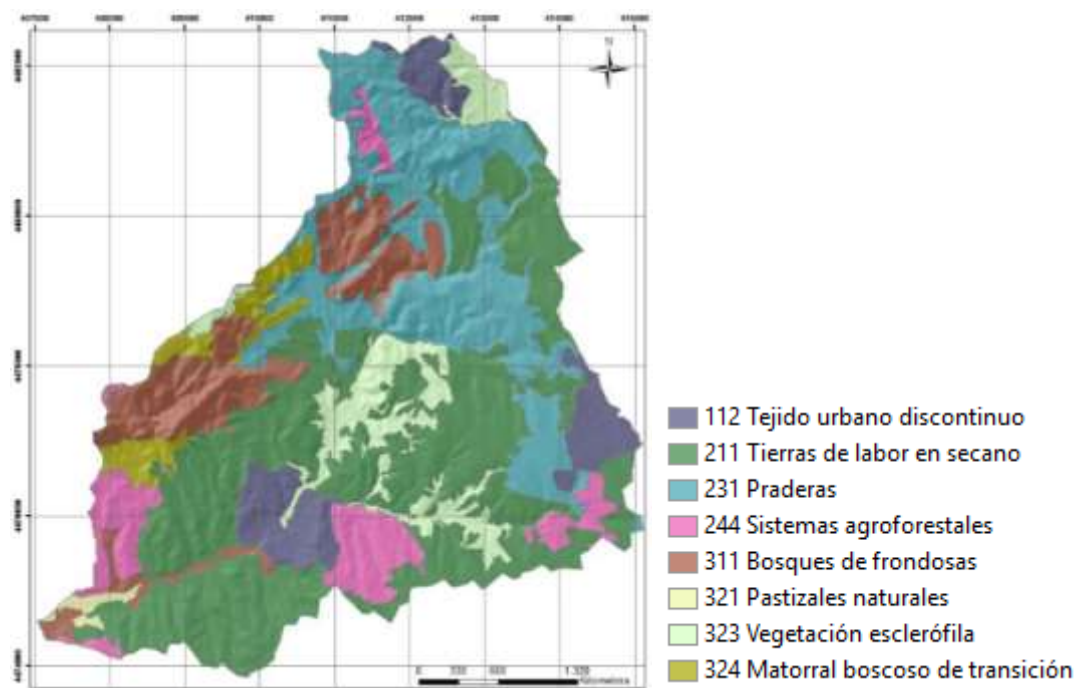


Figura 20 Usos del suelo en la subcuenca

Tabla 18 Área de los usos del suelo en la subcuenca

| Cod | Nombre | Área (km2) |
|-----|--------------------------------|------------|
| 112 | Tejido urbano discontinuo | 2.9326 |
| 211 | Tierras de labor en secano | 14.9657 |
| 231 | Praderas | 8.1586 |
| 244 | Sistemas agroforestales | 2.9437 |
| 311 | Bosques de frondosas | 4.3238 |
| 321 | Pastizales naturales | 0.2348 |
| 323 | Vegetación esclerófila | 3.0809 |
| 324 | Matorral boscoso de transición | 1.3276 |

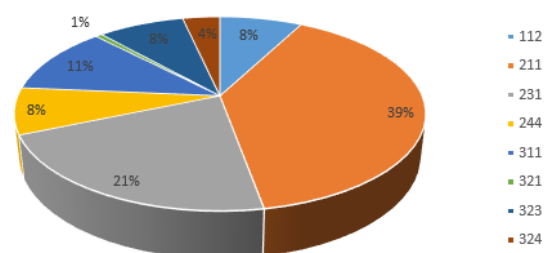


Gráfico 5 Porcentaje área de usos del suelo en la subcuenca

La reclasificación de los usos del suelo de acuerdo a la susceptibilidad se observa en la figura 22, y mediante el gráfico 6 o tabla 19 se infiere que en la subcuenca predomina una susceptibilidad media en el 48% del área especialmente hacia la parte sureste de la cuenca, y es alta y muy alta en el 22% del área, en donde se presentan generalmente pastizales, praderas y cultivos. La susceptibilidad más baja se encuentra en un 19% del área, hacia el oeste de la subcuenca, donde se encuentran los bosques de frondosas.

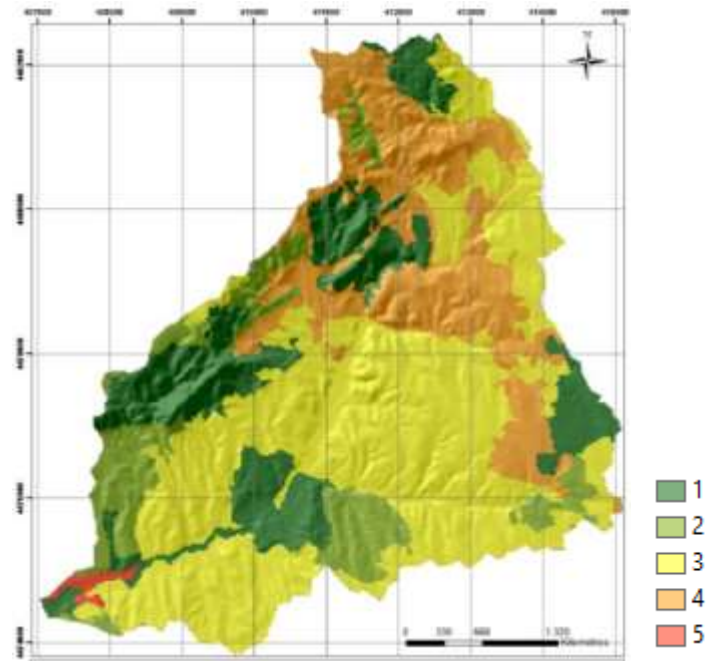


Figura 21 Usos del suelo reclasificados de la Subcuenca

Tabla 19 Área de susceptibilidad de la capa

| Susceptibilidad | Área (km ²) |
|-----------------|-------------------------|
| 1 | 7.251 |
| 2 | 4.256 |
| 3 | 18.05 |
| 4 | 8.168 |
| 5 | 0.2331 |

usos del suelo

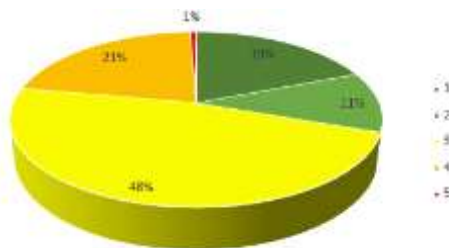


Gráfico 6 Porcentaje del área de susceptibilidad de usos del suelo

4.4.4 Cursos de agua

La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático son factores que condicionan la generación de remoción en masa (Lara & Sepulveda, 2008). Debido a que la circulación de agua por los cauces fluviales propicia el transporte o arrastre de sedimentos (García P. , 2004). El arrastre de material aumenta en épocas de avenidas especialmente en afluentes que carecen de

protección en sus márgenes, pues la fuerza erosiva del agua es mayor, y en el momento de descender el nivel de agua, las presiones intersticiales descompensadas pueden provocar los deslizamientos. (Ayala F. , 1989)

Partiendo de la red de drenaje de la subcuenca, presentada en la figura 23, se genera un mapa del área de influencia o distancia a los cursos de agua correspondiente a la figura 24. Donde las susceptibilidades más altas se presentan en el área de influencia más cercana al cauce. En la cuenca se presenta una susceptibilidad muy alta en 25% del área, según el gráfico 7 o tabla 20.

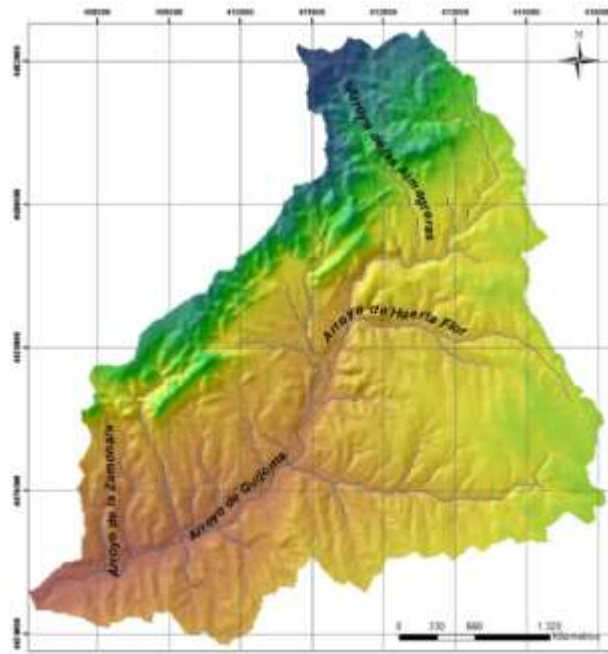


Figura 22 Red de drenaje de la subcuenca

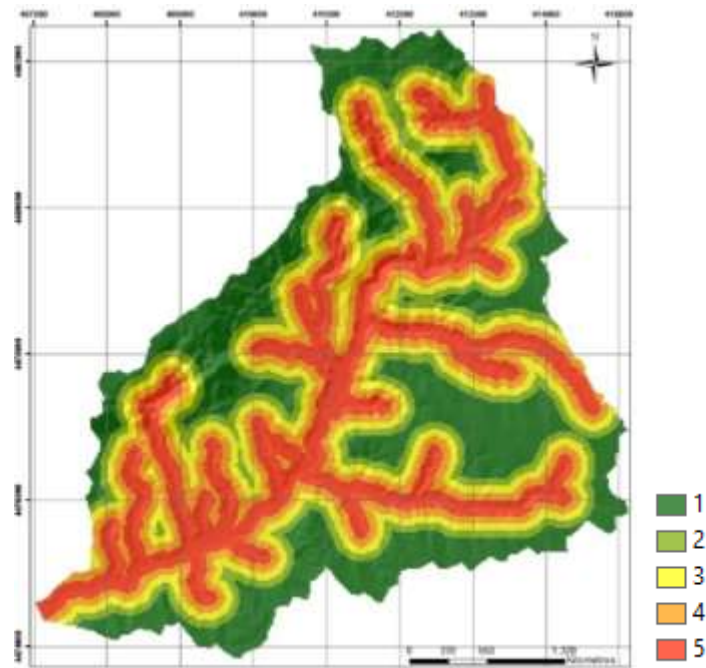


Figura 23 Influencia de la red de drenaje

Tabla 20 Área de influencia de la capa de drenaje

| Susceptibilidad | Área (km ²) |
|-----------------|-------------------------|
| 1 | 10.18 |
| 2 | 4.997 |
| 3 | 6.103 |
| 4 | 7.046 |
| 5 | 9.63 |

red de

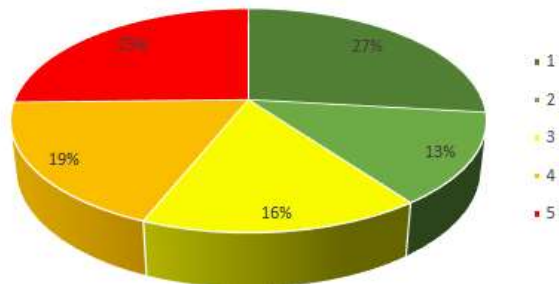


Gráfico 7 Porcentaje área de influencia de la red de drenaje

4.4.5 Determinación de la susceptibilidad

Una vez clasificadas las capas, se procede a realizar el análisis multicriterio. Para ello se elabora una matriz entre pares de los factores condicionantes o intrínsecos del terreno, como lo son: la litología, la pendiente, la cobertura vegetal, la cercanía a cursos de agua y estructuras. ver tabla 21, posteriormente se normaliza, ver tabla 22 y se verifica el nivel de consistencia, ver tabla 23.

Tabla 21 Matriz entre pares de los factores condicionantes

| Factores | Pendiente | Litología | Distancia a lineamientos estructurales | Distancia a cursos de agua | Usos del suelo | Peso |
|---|-----------|-----------|--|----------------------------|----------------|---------|
| Pendiente | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.2887 |
| Litología | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.2086 |
| Distancia a lineamientos estructurales | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0.2406 |
| Distancia a cursos de agua | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 3 | 0.1764 |
| Usos del suelo | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 1 | 0.08556 |

1 El criterio fila es Igualmente importante al criterio columna

3 El criterio fila es Moderadamente importante frente al criterio columna

5 El criterio fila es Notablemente más importante que el criterio columna

| Resultados | Valor |
|-----------------------------|-------|
| n máx. | 5.252 |
| Índice de consistencia (CI) | 0.063 |
| Índice aleatorio (RI) | 1.12 |
| Razón de consistencia (RC) | 0.056 |

7 El criterio fila tiene una Importancia muy fuerte frente al criterio columna

9 El criterio fila tiene Importancia absoluta sobre el criterio columna

2,4,6,8 Valores intermedios

Tabla 22 Matriz normalizada de criterios

| Factores | Pendiente | Litología | Distancia a lineamientos estructurales | Distancia a cursos de agua | Cobertura vegetal | Peso |
|---|-----------|-----------|--|----------------------------|-------------------|-------|
| Pendiente | 0.333 | 0.400 | 0.414 | 0.273 | 0.182 | 0.320 |
| Litología | 0.167 | 0.200 | 0.207 | 0.273 | 0.182 | 0.206 |
| Distancia a lineamientos estructurales | 0.167 | 0.200 | 0.207 | 0.273 | 0.273 | 0.224 |
| Distancia a cursos de agua | 0.167 | 0.100 | 0.103 | 0.136 | 0.273 | 0.156 |
| Cobertura vegetal | 0.167 | 0.100 | 0.069 | 0.045 | 0.091 | 0.094 |

Tabla 23 Razón de consistencia

Para la asignación de los valores de preferencia otorgados en la matriz entre pares, ver tabla 21. Se emplearon los mapas de los factores condicionantes, luego de realizar un análisis en cuanto al grado de susceptibilidad que presenta. Además, se tiene en cuenta que la pendiente es el factor que especialmente condiciona el desarrollo de procesos deslizamiento, debido a que generan inestabilidad en los materiales, y siendo el parámetro más usado en la mayoría de métodos de cálculo de estabilidad de taludes.

A continuación, se explican las relaciones de preferencia de la matriz entre pares:

- Pendiente – Litología: Las pendientes fuertes y muy fuertes representan el 16% del área de la cuenca, con valores entre 10° y 30° al oeste de la cuenca. La litología que presenta alta susceptibilidad esta compuesta por arenas, areniscas y limos, y se encuentra en un 6,2% del área, hacia el oeste de la cuenca, coincidiendo en las zonas de alta pendiente, por lo que se ha dado una ligera preferencia a las pendientes.
- Pendiente-Distancia a lineamientos estructurales: Se otorga una moderada preferencia a las pendientes, pues las altas pendientes representan un 16% del área de la cuenca, y se encuentran en las zonas donde se ubican las fallas.
- Pendiente - Distancia a cursos de agua: Se da una moderada preferencia a las pendientes sobre la distancia a cursos de agua, pues la velocidad de los cauces en la cuenca depende de la pendiente. Así, a mayor pendiente se tiene una mayor velocidad de flujo de agua, que y por tanto mayor aporte de arrastre o desprendimiento de materiales.
- Pendiente-Usos del suelo: Una preferencia al primer factor ya que, dependiendo de la topografía del terreno, resulta conveniente el uso de coberturas específicas.
- Litología-Distancia a estructuras lineales: Los dos criterios contribuyen de igual manera al proceso de deslizamiento, donde la zona de influencia de las fallas coincide con la litología de alta susceptibilidad.
- Litología- Distancia a cursos de agua: Se asigna un grado de preferencia de la litología sobre la distancia a cursos de agua, ya que la capacidad erosiva del agua está relacionada de forma directa con el grado de consolidación y características físico mecánicas del material afectado.
- Litología-Usos del suelo: Se da una importancia mayor a la litología, ya que el tipo de bosque natural tiende a modificarse con cambios en las formaciones geológicas y en las condiciones de los suelos. Por tanto, distintos tipos de suelo, producen el crecimiento de diferentes tipos de plantas.
- Distancia a lineamientos estructurales- Distancia a cuerpos de agua: Se da más importancia a la distancia a lineamientos, pues parte de la red de drenaje coincide con la orientación de las fallas. Debido a que, las fallas actúan como camino preferido del agua.
- Distancia a lineamientos estructurales- cobertura vegetal: Se asume una preferencia al primer factor ya que las variaciones de la densidad de la vegetación, dependen, de la capacidad de las rocas para retener humedad y de los suelos para alimentar a las plantas.
- Distancia a cuerpos de agua- cobertura vegetal: Se da dominancia del primer factor, ya que la composición, estructura y abundancia de la vegetación, se encuentran

determinadas por el régimen de caudal que circula por los cauces fluviales (Auble, Scott, & Friedman, 2005).

En los resultados de la tabla 23 se observa que las variables presentan una razón de consistencia R.C. menor a 0.1. Por tanto, los datos de la matriz de comparación a pares son consistentes y los pesos de acuerdo a la importancia otorgada a cada variable se pueden aplicar para realizar la suma ponderada. En la figura 25 se presenta el modelo de superposición ponderada como un proceso en Model Builder, teniendo como entradas las cinco variables o factores condicionantes (usos del suelo, pendientes, litología, cercanía a cursos de agua y la influencia de las estructuras o fallas) reclasificadas de 1 a 5 de acuerdo al grado de susceptibilidad que representan y como salida la susceptibilidad por movimientos en masa en la subcuenca. Esta herramienta de superposición *Weighted Overlay* toma los criterios de entrada y los multiplica por los pesos y después suma los resultados, aplicando la ecuación 4.

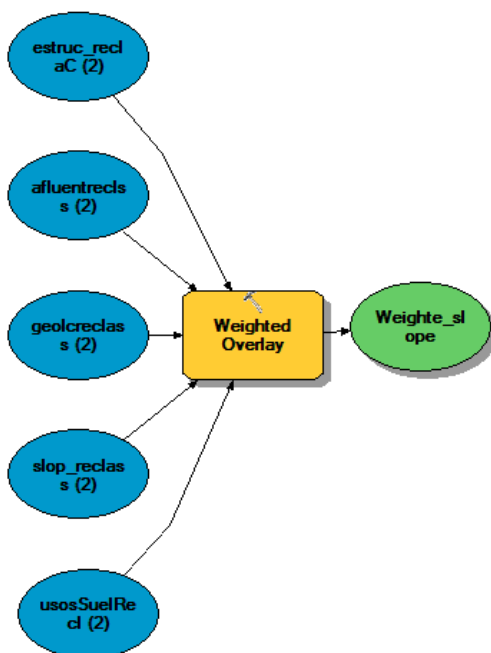


Figura 24 Proceso de Superposición ponderada

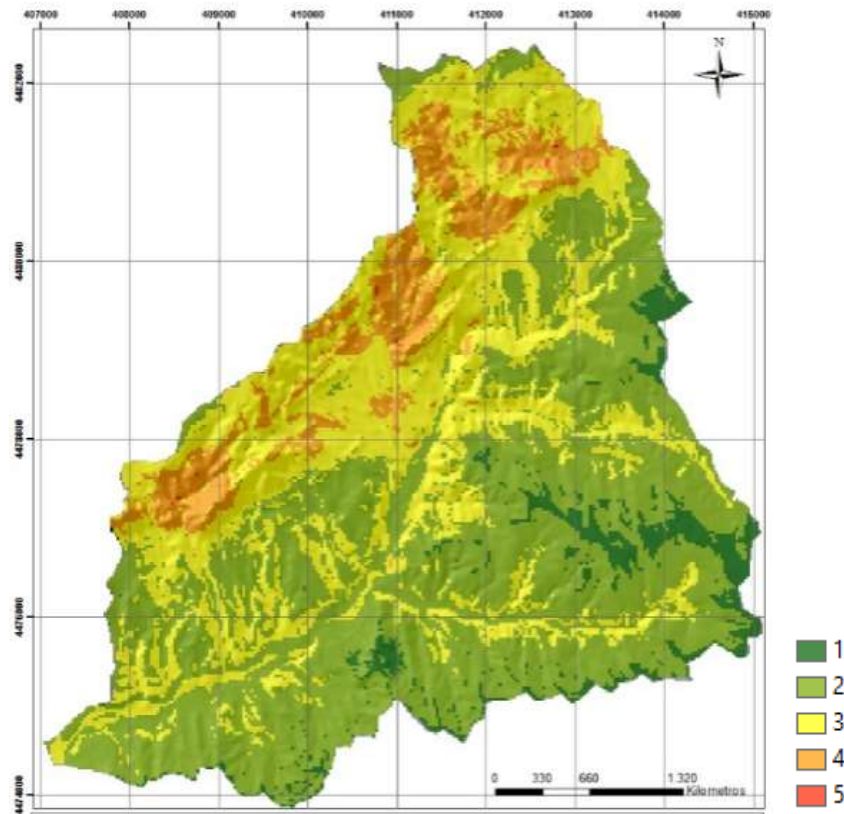
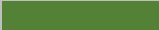
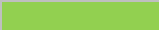





Figura 25 Susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca

Tabla 24 Susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca

| Simbología | Clase | Clase de susceptibilidad | Área (km2) | Área (%) |
|---|-------|--------------------------|------------|----------|
|  | 1 | Muy baja susceptibilidad | 1.7 | 4.5 |
|  | 2 | Baja susceptibilidad | 20.2 | 53.6 |
|  | 3 | Moderada susceptibilidad | 12.2 | 32.3 |
|  | 4 | Alta susceptibilidad | 3.6 | 9.54 |
|  | 5 | Muy alta susceptibilidad | 0.02 | 0.05 |

La salida del proceso de la superposición ponderada es la susceptibilidad ante movimientos en masa y se encuentra en la figura 26. Se puede observar que en la subcuenca predomina una baja susceptibilidad en un 53.6 % del área, concentrada especialmente hacia el este de la subcuenca, y se tiene una moderada y alta susceptibilidad en un 32.2 % y 9.54% del área respectivamente hacia el oeste, según los resultados de la tabla 24.

Así, las zonas de mayor susceptibilidad coinciden con la mayor parte del área de fuerte pendiente, en suelos inestables debido a su microestructura y a la facilidad de meteorización y en las áreas de mayor influencia de las fallas e influencia de la red de drenaje. A su vez, el papel de la vegetación

es importante, ya que en las fuertes pendientes se presenta vegetación boscosa que ayuda en la estabilización de la zona y permite que la susceptibilidad no sea mayor.

Por otro lado, estos resultados de susceptibilidad se encuentran en la figura 27, producto de la implementación de un visor web. El código HTML desarrollado se encuentra en el anexo 18, el cual se basa en la API de leaflet, por ser de carácter Open Source y su sencillez en cuanto al manejo y buena documentación. Además, para el intercambio de la información geográfica se realiza la transferencia de formatos shapefile y raster (de la subcuenca, los afluentes, las variables condicionantes y los resultados de la susceptibilidad a movimientos en masa) a formatos JSON, por su facilidad de integración con código Javascript y menor sobrecarga respecto a otros protocolos de intercambio de datos.

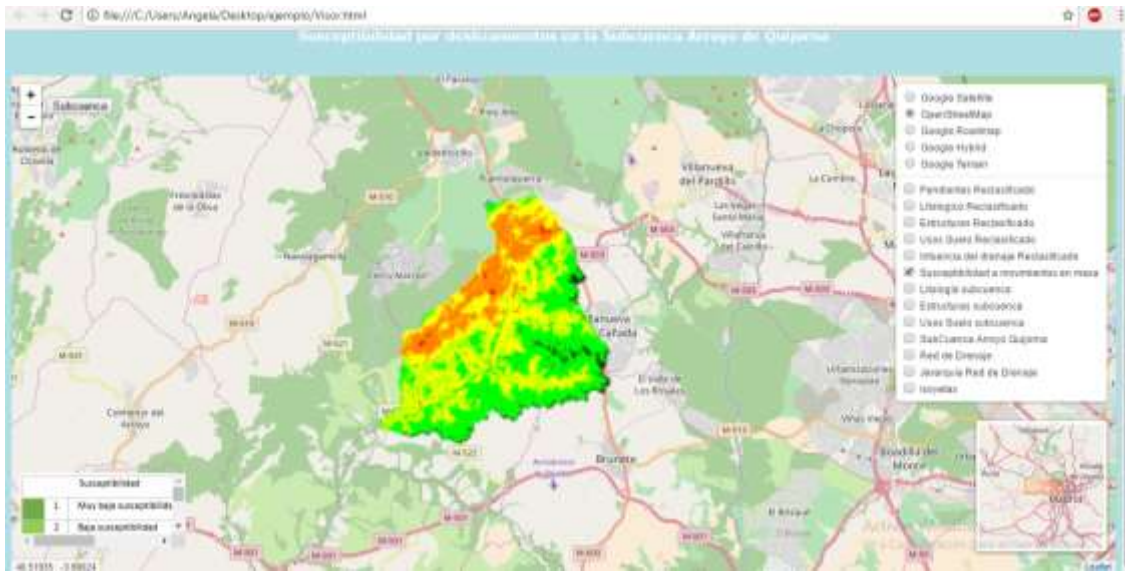


Figura 26 Visor web de resultados

4.4.6 Análisis de las precipitaciones

Realizada la evaluación de los factores condicionantes y determinación de la susceptibilidad de movimientos en ladera, se procede a analizar los factores externos, debido a que estos modifican el estado de los esfuerzos, la geometría del relieve o la resistencia de los materiales en el terreno. Estas modificaciones pueden ser originadas por procesos sísmicos, volcánicos, precipitaciones o antrópicos. Sin embargo, la elaboración de esta cartografía, suele presentar obstáculos debido a la limitación en la información y a la complejidad de estos procesos (Rodríguez, García, & Menéndez, 2016).

Según la base de datos de movimientos de ladera de España (ITGE 1988; ITGE 1994) (Ayala, 1995), el principal factor desencadenante, se debe a las precipitaciones intensas. Además, sumado a esto, el cambio ambiental global ha provocado variaciones de patrones climáticos, generando situaciones de desastres por amenazas hidrometeorológicas, especialmente de deslizamientos (Glade & Crozier, 2005) en (López, 2015). Es por ello que en este trabajo se incluye un análisis de las precipitaciones máximas en la subcuenca, que puedan servir en futuros estudios para el cálculo de la peligrosidad por movimientos en masa en la subcuenca o en otra zona de estudio.

Las precipitaciones en la subcuenca se analizan mediante el registro histórico de precipitaciones en 24 horas desde 1987, de las estaciones que se encuentran más próximas a la cuenca, como son, *el Retiro, Cuatro vientos y Colmenar viejo*, información proveniente del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid en formato Excel, ver tabla 25.

Con los datos de precipitación en 24 horas se evalúa la probabilidad de excedencia asociada a diferentes períodos de retorno, ajustando a la función de distribución de Gumbel, y comprobando a través del test de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov. Adicionalmente se realiza una prueba de bondad de ajuste basada en el coeficiente de determinación. Ver sección 2.6 para más detalle.

Una vez validado el ajuste de los datos, se determina la precipitación máxima asociada a cada período de retorno, ver tabla 26, 27 y 28. Posteriormente se determina la intensidad y duración de la precipitación máxima según el Ministerio de Fomento (BOE, 2016), ver tablas 30,31 y 32 y sus correspondientes curvas de intensidad duración, ver gráficos 8, 9 y 10.

Finalmente teniendo los datos de precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 100 años se realiza la comparación según las categorías de la tabla 7, para conocer cuáles pueden ser potencialmente generadoras de movimientos en masa.

Tabla 25 Estaciones meteorológicas próximas a la subcuenca

| Estación | Altitud (m) | Latitud | Longitud |
|------------------------|-------------|---------------|--------------|
| Madrid, Retiro | 667 | 40° 24' 43" N | 3° 40' 41" O |
| Madrid, Cuatro vientos | 690 | 40° 22' 32" N | 3° 47' 10" O |
| Colmenar viejo | 1004 | 40° 41' 46" N | 3° 45' 54" O |

Tabla 26 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación el Retiro

| Período de Retorno T (años) | $1 - \frac{1}{T} = F(x)$ | P máx en 24 h $x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$ |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 5 | 0.80 | 34.6 |
| 10 | 0.90 | 38.5 |
| 20 | 0.95 | 42.3 |
| 30 | 0.97 | 44.5 |
| 50 | 0.98 | 47.2 |
| 100 | 0.99 | 50.9 |

Tabla 27 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación cuatro vientos

| Período de Retorno T (años) | $1 - \frac{1}{T} = F(x)$ | P máx en 24 h $x = u - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$ |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 5 | 0.80 | 36.0 |
| 10 | 0.90 | 40.4 |

| | | |
|-----|------|------|
| 20 | 0.95 | 44.6 |
| 30 | 0.97 | 47.0 |
| 50 | 0.98 | 50.0 |
| 100 | 0.99 | 54.1 |

Tabla 28 Precipitaciones diarias máximas probables en 24 horas, estación colmenar viejo

| Período de Retorno T (años) | $1 - \frac{1}{T} = F(x)$ | P máx en 24 h |
|-----------------------------|--------------------------|---------------|
| 5 | 0.80 | 46.5 |
| 10 | 0.90 | 52.5 |
| 20 | 0.95 | 58.3 |
| 30 | 0.97 | 61.7 |
| 50 | 0.98 | 65.9 |
| 100 | 0.99 | 71.5 |

Tabla 29 Calidad del ajuste del registro de precipitaciones

| Estación | Datos | Parámetros | | Test Smirnov-Kolmogorov | | Coeficiente de determinación R ² |
|----------------|-------|------------|------|-------------------------|------|---|
| | | u | d | D | Dt | |
| El retiro | 25 | 26.71 | 0.19 | 0.125 | 0.27 | 0.967 |
| Cuatro Vientos | 25 | 27.22 | 0.17 | 0.087 | 0.27 | 0.972 |
| ColmenarViejo | 25 | 34.42 | 0.12 | 0.093 | 0.27 | 0.984 |

La calidad del ajuste de los datos de precipitación máxima en 24 horas, según la tabla 29, muestra que en todas las estaciones el test de bondad de Kolmogorov Smirnov da como resultado que los valores de D son menores a Dt, ($D < Dt$), confirmando así, un buen ajuste de los datos con un 95% de confiabilidad. Además, se realiza otra prueba de bondad de ajuste basada en el coeficiente de determinación mostrando que todos los valores se encuentran entre $0 < R^2 < 1$, y que el modelo explica en más del 95% las variaciones de la frecuencia.

Tabla 30 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación el retiro

| Tiempo de duración h | Intensidad de la lluvia (mm/h) según el Periodo de Retorno | | | | | |
|-------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 |
| 1 | 12.90 | 14.37 | 15.78 | 16.59 | 17.60 | 18.97 |
| 2 | 8.49 | 9.46 | 10.39 | 10.92 | 11.59 | 12.49 |
| 3 | 6.56 | 7.31 | 8.02 | 8.44 | 8.95 | 9.65 |
| 4 | 5.43 | 6.04 | 6.64 | 6.98 | 7.41 | 7.98 |
| 5 | 4.67 | 5.20 | 5.71 | 6.00 | 6.37 | 6.86 |
| 6 | 4.11 | 4.58 | 5.03 | 5.29 | 5.62 | 6.05 |
| 8 | 3.36 | 3.74 | 4.11 | 4.32 | 4.58 | 4.94 |
| 10 | 2.86 | 3.18 | 3.49 | 3.67 | 3.90 | 4.20 |
| 12 | 2.50 | 2.78 | 3.05 | 3.21 | 3.41 | 3.67 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 24 | 1.46 | 1.63 | 1.79 | 1.88 | 1.99 | 2.15 |
|----|------|------|------|------|------|------|

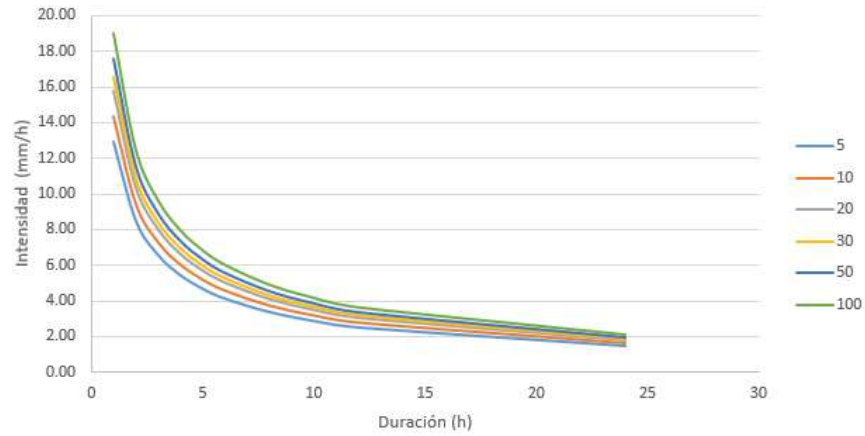


Gráfico 8 Curva Intensidad duración, estación el retiro

Tabla 31 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación cuatro vientos

| Tiempo de duración h | Intensidad de la lluvia (mm /h) según el Periodo de Retorno | | | | | |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 |
| 1 | 13.42 | 15.05 | 16.62 | 17.53 | 18.65 | 20.18 |
| 2 | 8.83 | 9.91 | 10.95 | 11.54 | 12.28 | 13.29 |
| 3 | 6.82 | 7.66 | 8.45 | 8.91 | 9.49 | 10.26 |
| 4 | 5.65 | 6.33 | 6.99 | 7.37 | 7.85 | 8.49 |
| 5 | 4.85 | 5.45 | 6.01 | 6.34 | 6.75 | 7.30 |
| 6 | 4.28 | 4.80 | 5.30 | 5.59 | 5.95 | 6.44 |
| 8 | 3.49 | 3.92 | 4.33 | 4.56 | 4.86 | 5.25 |
| 10 | 2.97 | 3.33 | 3.68 | 3.88 | 4.13 | 4.47 |
| 12 | 2.60 | 2.91 | 3.22 | 3.39 | 3.61 | 3.90 |
| 24 | 1.52 | 1.70 | 1.88 | 1.98 | 2.11 | 2.28 |

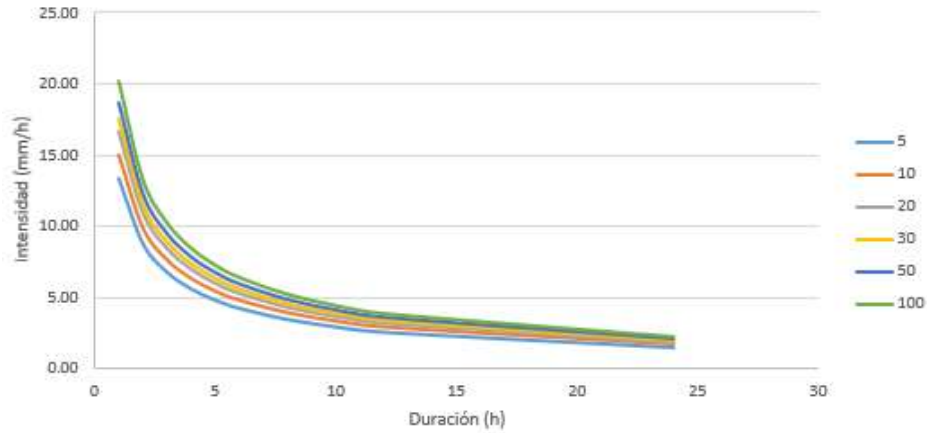


Gráfico 9 Curva Intensidad duración, estación el retiro

Tabla 32 Intensidad de precipitación por duración de lluvia y frecuencia, estación colmenar viejo

| Tiempo de duración | Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno | | | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hr | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 |
| 1 | 17.34 | 19.59 | 21.75 | 23.00 | 24.55 | 26.65 |
| 2 | 11.41 | 12.90 | 14.32 | 15.14 | 16.16 | 17.55 |
| 3 | 8.82 | 9.96 | 11.06 | 11.70 | 12.49 | 13.55 |
| 4 | 7.29 | 8.24 | 9.15 | 9.67 | 10.33 | 11.21 |
| 5 | 6.27 | 7.09 | 7.87 | 8.32 | 8.88 | 9.64 |
| 6 | 5.53 | 6.25 | 6.94 | 7.34 | 7.83 | 8.50 |
| 8 | 4.51 | 5.10 | 5.66 | 5.99 | 6.39 | 6.94 |
| 10 | 3.84 | 4.34 | 4.82 | 5.09 | 5.44 | 5.90 |
| 12 | 3.35 | 3.79 | 4.21 | 4.45 | 4.75 | 5.16 |
| 24 | 1.96 | 2.22 | 2.46 | 2.60 | 2.78 | 3.02 |

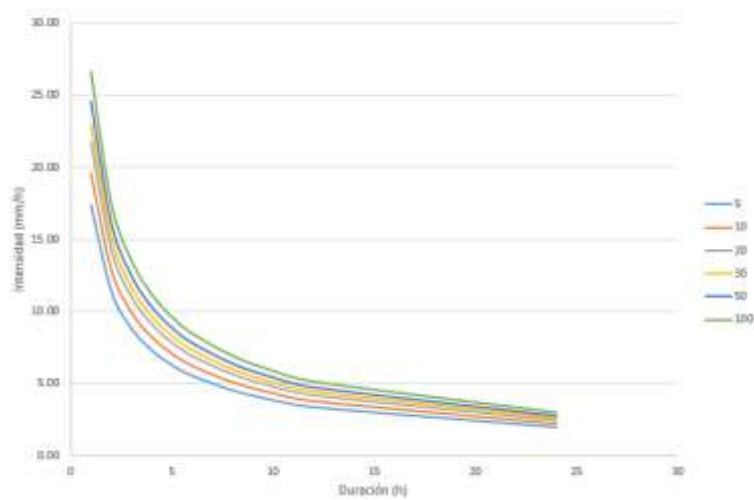


Gráfico 10 Curva Intensidad duración, estación colmenar viejo

Mediante el uso de las tablas 30, 31 y 32 de intensidad de precipitación por duración de lluvia, y los gráficos de las curvas de intensidad y duración 8, 9 y 10, es posible estimar la intensidad de las tormentas a distintas duraciones y períodos de retorno, que para este caso de estudio se requiere se requiere a una duración de 24 horas y un período de retorno de 100 años

Al contrastar los valores de precipitación máxima para un período de retorno de 100 años en 24 horas, con los valores de la tabla 7, para determinar si las precipitaciones de la subcuenca presentan algún tipo de susceptibilidad de deslizamientos de ladera, se observa que todas las precipitaciones son menores a 100 mm y por tanto presentan un muy bajo grado de susceptibilidad.

Teniendo dichos máximos de precipitación para cada período de retorno, se procede a la estimación de la distribución espacial de precipitación, ver anexo 17. Esta cartografía es compleja cuando la densidad de estaciones de medición es baja o cuando se presentan grandes distancias entre las estaciones y la zona objeto de estudio. Para representar estas distribuciones de precipitación se ha aplicado la técnica de interpolación espacial del Inverso de la Distancia Ponderada (IDW), resultado representado en la figura 29.

El IDW es un método avanzado de la técnica del vecino más próximo que utiliza la distancia de los puntos con datos, hacia el punto desconocido, asignando un peso a los diferentes puntos. Este método asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia; de esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia. (Tveito & Schoner, 2002)

Para la cuenca estudiada se selecciona un punto X indicado dentro de la figura 28, a partir de varias estaciones meteorológicas, denominadas S con $S = 1, 2, \dots, n$, distantes del mismo una distancia $d_{s,x}$, se puede proceder a evaluar la precipitación para el sitio deseado, haciendo uso de la expresión 22.

$$P_x = \sum_{s=1}^{s=n} [P_s, W_{sx}] \quad \text{Ecuación 22 Precipitación IDW}$$

en la cual:

P_x = precipitación en el sitio X del proyecto, en mm

P_s = precipitación en el sitio de la estación de referencia S, en mm

W_{sx} = factor de peso de la estación S respecto del sitio X del proyecto, adimensional, que se obtiene para cada una de las estaciones de referencia mediante la ecuación 23

$$W = \frac{\frac{1}{d_{sx}^2}}{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{d_{kx}^2}} = \frac{\frac{1}{d_{sx}^2}}{\frac{1}{d_{1x}^2} + \frac{1}{d_{2x}^2} + \frac{1}{d_{3x}^2} + \dots + \frac{1}{d_{nx}^2}} \quad \text{Ecuación 23 Factor de peso IDW}$$

En donde:

$d_{s,x}$ =distancia entre la estación S y el punto X , en km

$d_{k,x}$ =distancia entre las estaciones K y el punto X , en km, con $K=S$

n =número total de estaciones de referencia utilizadas en el procedimiento

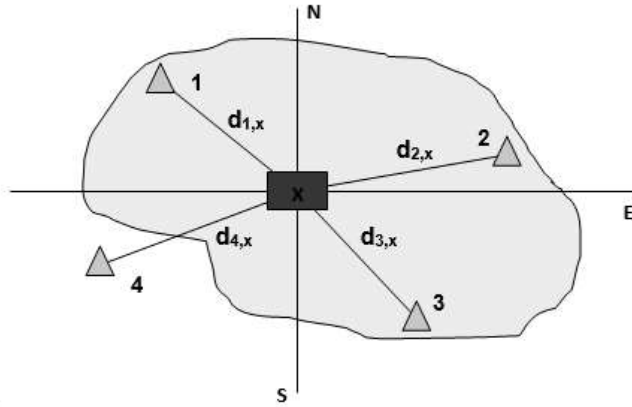


Figura 27 Método de la ponderación del cuadrado de las distancias recíprocas. Fuente: (CAR, 2010)

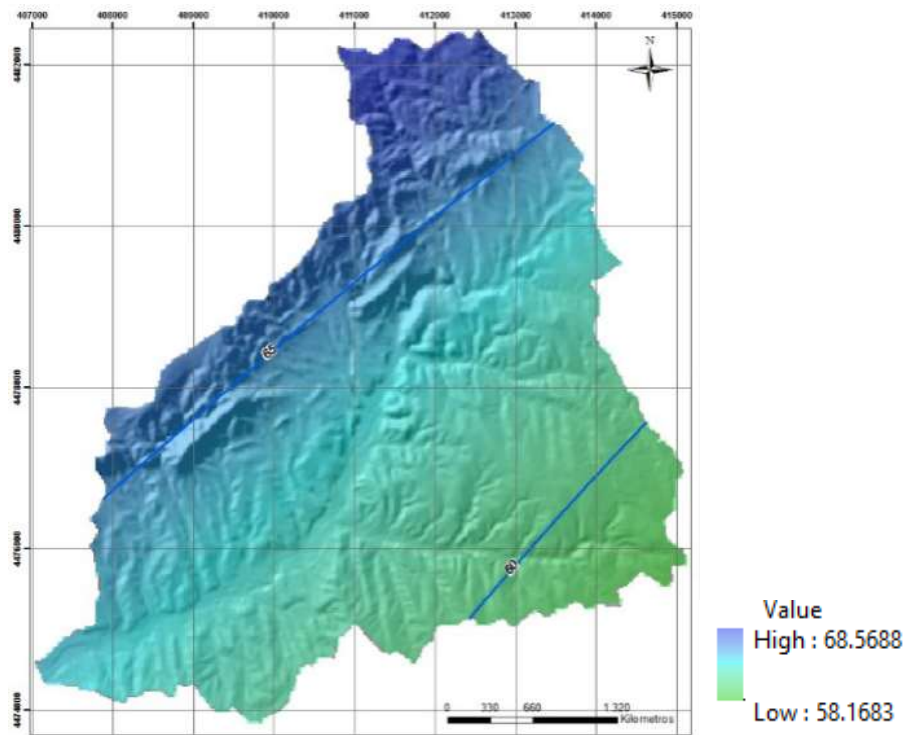


Figura 28 Lluvias máximas en 24 horas con período de retorno de 100 años en la subcuenca

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m [(P_j + P_{j+1})/2] \cdot A_j}{\sum_{j=1}^m A_j}$$

Ecuación 24 Precipitación mediante isoyetas

Donde: P_j: valor de la precipitación de la isoyeta j, A_j: área incluida entre dos isoyetas consecutivas (j y j+1), m: número total de isoyetas.

Tabla 33 Área entre Isoyetas

| ID | Área (km2) |
|----|------------|
| 0 | 3.09 |
| 1 | 27.7 |
| 2 | 7.15 |

Los valores de precipitación máxima para un período de retorno de 100 años en un tiempo de duración de 24 horas, no fluctúan demasiado ya que se encuentran entre 58.16 a 68.56 mm, estando los valores más altos hacia el noroeste de la subcuenca, según la figura 29. Por tanto, se encuentra homogeneizada la precipitación incidente en la zona de estudio, debido al tamaño y relieve propio de la subcuenca. Además, se tiene una precipitación media de 63.03 mm resultado de la ecuación 24.

CONCLUSIONES

Los SIG son herramientas de manejo y análisis de datos espaciales georreferenciados, que mediante modelos de geoprocésamiento automatizados mejoran la administración de la información, al permitir la inspección y modificación de la secuencia de procesos. Permitiendo así, que los modelos realizados para esta subcuenca, puedan ser aplicados a otras zonas de estudio.

La modelación de los procesos se llevó a cabo para delinear la subcuenca a partir de un MDT, obtener la red de drenaje y calcular los parámetros morfométricos. Posteriormente se determinó la susceptibilidad de movimientos de ladera, y finalmente en el último modelo se calcularon las precipitaciones máximas probables en la subcuenca.

El método de Evaluación Multicriterio permitió determinar la susceptibilidad de movimientos en masa, valorando los factores condicionantes mediante la superposición de capas y la ponderación, de acuerdo a la influencia de cada factor en el software ArcGis. Para lo cual se reclasificó cada capa ráster de los factores a una escala en común, luego se multiplicó cada capa por el peso o influencia según los resultados del método AHP, y finalmente estos resultados se sumaron.

La aplicación web de las capas de entrada y del resultado de la susceptibilidad se llevó a cabo para permitir el acceso y manipulación a la información geográfica sin depender de un SIG con datos locales. Impulsando así, la difusión de los datos geográficos de un modo más eficiente, y promoviendo el trabajo colaborativo, para que otros usuarios puedan hacer uso de dicha

información y puedan aportar al desarrollo de futuros trabajos en la subcuenca encaminados a la gestión del riesgo.

La determinación de la peligrosidad, tiene en cuenta los factores detonantes y condicionantes, integrando así todas las condiciones que pueden activar dichos fenómenos. Sin embargo, para la elaboración de la cartografía es necesario contar con la mayor información posible.

El estudio de cuencas es importante, ya que son sistemas naturales de gran importancia al ser prestadoras de bienes y servicios y receptoras de desechos. La determinación de los parámetros morfométricos ayudaron a entender y caracterizar la subcuenca. Así, estos cálculos infirieron que la cuenca no tiene tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua, que presenta suelos permeables y rocas persistentes, y que debido al suave relieve presentado los picos ante crecidas son menos violentos. Sin embargo, hacía el oeste de la cuenca, que es donde se encuentran las pendientes más elevadas, es donde se debe prestar más atención debido a que esas pendientes es donde se incrementa la velocidad del caudal y el arrastre de sedimentos en caso de tormentas.

Las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que alteran la estabilidad en la subcuenca son: las fuertes pendientes representando un 16% del área de la subcuenca, los suelos esquistosos, arenosos-limosos y llanuras de inundación que ocupan un 6% del área, la cercanía a fallas en un 14% del área, los pastizales y praderas un 22% del área y la cercanía a redes de drenaje en un 25% del área de la subcuenca. Estas características más susceptibles se encuentran localizadas en su mayoría hacía el oeste de la zona.

Los resultados de la evaluación multicriterio muestran que el 32.3% y el 9.54% del área presentan una moderada y alta susceptibilidad respectivamente hacía el oeste de la cuenca. Es importante así, resaltar la importancia de la vegetación como agente estabilizador, ya que, en las zonas más susceptibles de deslizamientos, es donde se encuentra la vegetación leñosa, permitiendo así, que no aumente la susceptibilidad.

La evaluación de la precipitación como agente detonante muestra un valor medio de 63.03 mm, donde las mayores cantidades de precipitación se concentran al oeste de la subcuenca. Sin embargo, estas cantidades no representan una susceptibilidad significativa en la generación de movimientos de ladera.

Se destaca el papel del ser humano en la estabilidad de las laderas, ya que actividades como la urbanización, los cambios de uso del suelo, la extracción de material, entre otros, contribuyen a la disminución de la resistencia del material, y por tanto al potenciamiento de movimientos en masa.

REFERENCIAS

- Abad, I. (2014). *Estimación de la precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica*. Recuperado el 08 de 05 de 2017, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19857/1/Tesis.pdf>
- Abril, L. (2011). *Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>
- Aguilar, A. (2004). *Geografía general* (Segunda ed.). México: Pearson. Recuperado el 26 de 04 de 2017
- Aguilar, E., & Granell, C. (2015). *Geobibliotecas* (1 ed.). (J. Guallar, Ed.) UOC. Recuperado el 25 de 05 de 2017
- Alcaraz, F. (2012). *El bosque y la maquia esclerofila*. Recuperado el 29 de 04 de 2017, de <http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema25.pdf>
- Alfonso, J. (Julio de 2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional pico de Tancitaro*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Alonso, A. (2010). Petrología sedimentaria. Notas de teoría. 6. Rocas detríticas. Componentes y caracterización de los distintos tipos. Obtenido de <http://eprints.ucm.es/10119/1/157-302-1-PB.pdf>
- Anaya, O. (2012). *Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, provincia Huanuco, región Huanuco*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARACTERIZACION%20MORFOMETRICA%20DE%20LA%20CUENCA%20HIDROGRAFICA%20C HINCHAO,%20DISTRITO%20DE%20CHINCHAO,%20PROVINCIA%20DE%20HUANUCO,.pdf
- Apaclla, R. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico*. Recuperado el 03 de Agosto de 2016, de <http://www.ana.gob.pe/media/390377/informe%20final%20zona%20centro.pdf>
- Araya, J. (2002). *Apuntes de cátedra de geomorfología*. Santiago de Chile: Escuela de Geografía. Recuperado el 11 de 04 de 2017
- ArcGeek. (2016). Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <http://acolita.com/delimitar-automaticamente-micro-cuenca-hidrografica-especifica-en-arcgis/>
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. (2010). *Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Edier_Aristizabal/publication/234076770_Una_revision_sobre_el_estudio_de_movimientos_en_masa_detonados_por_lluvias/links/00b4951a0b2e8c0f3f000000.pdf?origin=publication_list

- Auble, G., Scott, M., & Friedman, J. (2005). Use of individualistic streamflow vegetation relations along the Fremont river, Utah, USA to assess impacts of flow alteration on wetland and riparian areas. *Wetlands*. 25, 143-154. Recuperado el 08 de 05 de 2017
- Ayala. (1995). *Reducción de riesgos geológicos en España*. (I. T. España, Ed.) Madrid.
- Ayala, F. (1989). *Elaboración de directrices de riesgos geológicos para protección civil*. Obtenido de http://info.igme.es/SidPDF%5C065000%5C108%5C65108_0001.pdf
- Ayala, F., Olcina, J., & Vilaplana, J. (2004). *Impacto social de los riesgos naturales en España en el período 1990-2000 (II)*. Recuperado el 27 de 04 de 2017
- Ayala, F., Olcina, J., & Vilaplana, J. (2004). *Impacto social de los riesgos naturales en España en el período 1990-2000. Gerencia de Riesgos XXI*.
- Barredo, J. (1996). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio, en la ordenación del territorio*. España: RA-MA. Recuperado el 20 de 04 de 2017
- Barrero, S. (2005). *Rocas Sedimentarias*. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de <http://introgeo.gl.fcen.uba.ar/Introduccion/Tprocasystrucsedim/TProcystrucsediment.PDF>
- Barrientos, V. (2009). *Geología y Morfología del Terreno*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de ftp://ceres.udc.es/IT_Obras_Publicas/Troncales/Geologia_Morfologia_Terreno/Notas_de_Curso/GMT_09_Notas_IV.pdf
- Blanco, F., López, I., Herrera, A., Magdaleno, F., & Martínez, R. (s.f.). *Relación entre vegetación riparia y caudales: resultados preliminares en tramos fluviales del sur de España*. Recuperado el 09 de 05 de 2017, de http://www.mediodes.com/pdfs/es/cientificas/Vegetacion%20riparia%20y%20caudales_texto%20completo.pdf
- BOE. (10 de Marzo de 2016). *Norma 5.2- IC. Drenaje superficial*. Recuperado el 04 de 03 de 2017, de <https://www.boe.es/boe/dias/2016/03/10/pdfs/BOE-A-2016-2405.pdf>
- Bonachea, P. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos debidos a procesos geomorfológicos. 278. Recuperado el 22 de 04 de 2017
- Bustillo, A., Jiménez, J., & Bustillo, J. (2012). Caracterización geoquímica de rocas sedimentarias formadas por silicificación como fuentes de suministro de utensilios líticos (Mioceno, cuenca de Madrid). 29. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742012000100016
- Caine, N. (01 de 1980). The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler Series A Physical Geography* , 23:27. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/271676976_The_Rainfall_Intensity_Duration_Control_of_Shallow_Landslides_and_Debris_Flows

- Campos, D. (1992). *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Mexico: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- CAR. (2010). *Actualización de la oferta hídrica superficial para las cuencas hasta de quinto orden para la jurisdicción de la CAR*. Recuperado el 08 de 05 de 2017
- Cárdenas, A., & Kabir, F. (2006). *nsayo metodológico para la evaluación y zonificación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa, Cuenca de Loja*. Recuperado el 08 de 05 de 2017, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2440>
- Carraca, A., & Guzzetti, F. (1993). *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/44367995_Geographical_information_systems_in_assessing_natural_hazards_edited_by_Alberto_Carrara_and_Fausto_Guzzetti
- Carraca, A., Cardinali, M., & Guzzeti, F. (1992). *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Journal, The Netherlands. Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Cervantes, R. (2008). *Propuesta de herramientas para el desarrollo de procesos de cogestión de cuencas hidrográficas en América Central*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <http://www.sidalc.net/repdoc/A2931e/A2931e.pdf>
- Chow, V., & Mays, L. (1977). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill.
- Civis, J., Pardo, G., Gonzáles, J., Alonso, G., Anadón, P., & Viseras, C. (2004). *Cuencas Cenozoicas*. Recuperado el 13 de 04 de 2017, de http://oa.upm.es/4007/2/TORRES_CL_2004_01.pdf
- Copons, R., & Tallada, A. (2009). *Movimientos de ladera*. Recuperado el 17 de 04 de 2017, de <http://docplayer.es/27529056-Movimientos-de-ladera.html>
- Cruden, D. (04 de 1991). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <https://link.springer.com/journal/10064>
- Delgadillo, A., & Paez, G. (2008). *Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas*. (C. Ferrer, & M. Dugarte, Edits.) Recuperado el 09 de 05 de 2017
- Delgado, J. (10 de 2010). *Prácticas de Geología*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de ftp://ceres.udc.es/Grado_IOP/Primer_Curso/Geologia/Practicas/Practicas_de_GEOLOGIA.pdf
- Delgado, J., Padilla, F., & Barrientos, V. (10 de 2010). *Prácticas de Geología*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de ftp://ceres.udc.es/Grado_IOP/Primer_Curso/Geologia/Practicas/Practicas_de_GEOLOGIA.pdf
- Díaz, E. (2005). *Itinerario Geológico por el norte de la comunidad de Madrid*. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de <https://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geologicas/ItinerariosGeologicos/itinerarioNorte/ItinerarioNorte.pdf>

- Díaz, J. (1998). *Evaluación del potencial acuícola costero mediante la aplicación de un sistema de información geográfica: dos estudios caso en Oaxaca y Chiapas*. Méxco: UNAM. Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Díez, A. (2001). *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche, Modelos y SIG para la gestión de Riberas*. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de <http://biblioteca.ucm.es/tesis/geo/ucm-t25361.pdf>
- Eguiluz, J. (2008). *Introducción a AJAX*. Recuperado el 25 de 05 de 2017, de http://www.jesusda.com/docs/ebooks/introduccion_ajax.pdf
- Elmes, E. (03 de 2015). *Amenaza debido a eventos de precipitación máxima entre los 21° y 34° latitud sur de Chile continental. Análisis de umbrales hidrometeorológicos, gatillantes de remoción en masa por flujos en la cuenca del río Copiapó*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140659>
- Elmes, M. (03 de 2006). *Análisis y evaluación de riesgos por movimientos en masa, inundación y sismicidad en el piedmont de la comuna de punte alto*. Recuperado el 11 de 04 de 2017, de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/elmes_m/sources/elmes_m.pdf
- Errea, A., García, J., Lorente, A., Martí, C., Beguería, S., & Arnáez, J. (1999). Factores en la generación de crecidas en una cuenca de campos abandonados, Pirineo central español. *Cuadernos de investigación geográfica*, 7-24. Recuperado el 09 de 05 de 2017
- ESRI. (2016). *Conjunto de herramientas de Superposición*. Recuperado el 08 de 05 de 2017, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-overlay.htm>
- ESRI. (s.f.). *Comprender los sistemas de drenaje*. Recuperado el 04 de Agosto de 2016, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-drainage-systems.htm>
- ESRI. (s.f.). *Introducción a ArcGIS*. Recuperado el 27 de 06 de 2017, de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Feito, F., & Segura, R. (2010). Herramientas SIG 3D. *Virtual Archaeology Review*, 1(1). Recuperado el 28 de 05 de 2017
- Fernández, A. (2008). *Diseño de una herramienta de Evaluación Multicriterio*. Recuperado el 10 de 04 de 2017, de http://oa.upm.es/7304/1/PFC_ANA_FERNADEZ_BUSTILLO.pdf
- García , J. C. (2005). *Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://info.igme.es/SidPDF/113000/263/113263_0000010.pdf
- García, J. (2012). *Metodología para la selección de la mejor desagregación de series de tiempo para pronóstico*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13685/GarciaBuitragoJavierAlexander2012.pdf?sequence=1>

- García, J. (2012). *Metodología para la selección de la mejor desagregación de series de tiempo para pronóstico*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13685/GarciaBuitragoJavierAlexander2012.pdf?sequence=1>
- García, M. (2009). *Metodologías para la evaluación de la peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/286357563_Metodologias_para_la_evaluacion_de_la_peligrosidad_a_los_deslizamientos_inducidos_por_terremotos
- García, P. (2004). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. (F. Valladares, Ed.) Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado el 29 de 04 de 2017, de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/48695/1/Interacciones%20entre%20la%20vegetaci%C3%B3n%20y%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). *Caracterización morfológica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <http://www.revistas.unlp.edu.ar/domus/article/download/476/505>
- Gauchat, J. (2012). *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. marcombo. Recuperado el 25 de 05 de 2017, de <https://adegiusti.files.wordpress.com/2013/09/el-gran-libro-de-html5-css3-y-javascript.pdf>
- Glade, T., & Crozier, M. (2000). *Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical "Antecedent Daily Rainfall Model"*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/257317834_Applying_Probability_Determination_to_Refine_Landslide-triggering_Rainfall_Thresholds_Using_an_Empirical_Antecedent_Daily_Rainfall_Model
- Glade, T., & Crozier, M. (2005). The Nature of Landslide Hazard Impact. *Landslide Hazard and Risk*, 43-74. Recuperado el 06 de 05 de 2017
- González, A. (2004). Análisis morfológico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.N*(38), 311-329. Recuperado el 10 de 05 de 2017
- González, E. (2003). *Aspectos geomecánicos de los deslizamientos rápidos: modelización y diseño de estructuras de contención*. Recuperado el 27 de 04 de 2017, de <http://oa.upm.es/242/1/04200327.pdf>
- Graciano, S. (2015). *Estimación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en las microcuencas de los corregimientos de villa restrepo y juntas de la cuenca Combeima Ibagué-Tolima*. Recuperado el 01 de 05 de 2017, de <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1543/1/RIUT-GDA-spa-2015-Estimaci%C3%B3n%20de%20umbrales%20de%20lluvia%20detonante%20de%20deslizamientos%20en%20las%20microcuencas.pdf>

- Gray, D., & Leiser, A. (1982). *Biotechnical slope protection and erosion control*. (V. N. Company, Ed.) Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Guerra, F. (2003). *Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan*. Recuperado el 09 de 05 de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100008
- Gumbel, E. (1994). There Turn Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 163-190. Recuperado el 02 de 05 de 2017
- Haddad, B. (2007). *Modelización numérica mediante elementos finitos y shp de los geomateriales fluidificados: aplicación a los deslizamientos rápidos de ladera*. Recuperado el 27 de 04 de 2017, de <http://eprints.ucm.es/7737/1/T29988.pdf>
- Hauser, Y. A. (1997). *Los aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre* (Boletín ; no. 49 ed.). Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Recuperado el 23 de 04 de 2017
- Hernández, L. (2006). *Modelación de la interacción río acífero y su aplicación a un caso práctico*.
- Hervás, J., Barredo, J., & Lomoschitz, A. (2002). *Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y métodos de evaluación multicriterio, aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria)*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://repositorio.ulpgc.es/bitstream/10553/1743/1/5272.pdf>
- Horton, R. (1945). *Erosional Development of Streams and their Drainage Basins* (Vol. 56). Bull. Geol. Soc. Am. Recuperado el 15 de 04 de 2017
- Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/toskano_hg/toskano_hg.htm
- Ibañez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (s.f.). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>
- Ibáñez, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.N*(38), 311-329. Recuperado el 09 de 05 de 2017
- ICGC. (2016). *Elementos de los mapas geológicos*. Recuperado el 26 de 04 de 2017, de http://www.igc.cat/web/es/mapageol_atles_elements.html
- ICOG. (07 de 2008). *Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://www.icog.es/files/GUIA_CARTOGRAFIAS_RIESGOS_NATURALES.pdf
- IGME. (s.f.). *Cartografía del IGME. MAGNA 50 - Hoja 558 (MAJADAHONDA)*. (J. Portero, G. Cancer, M. Peinado, C. Casquet, & C. Villaseca, Editores) Recuperado el 01 de 04 de 2017

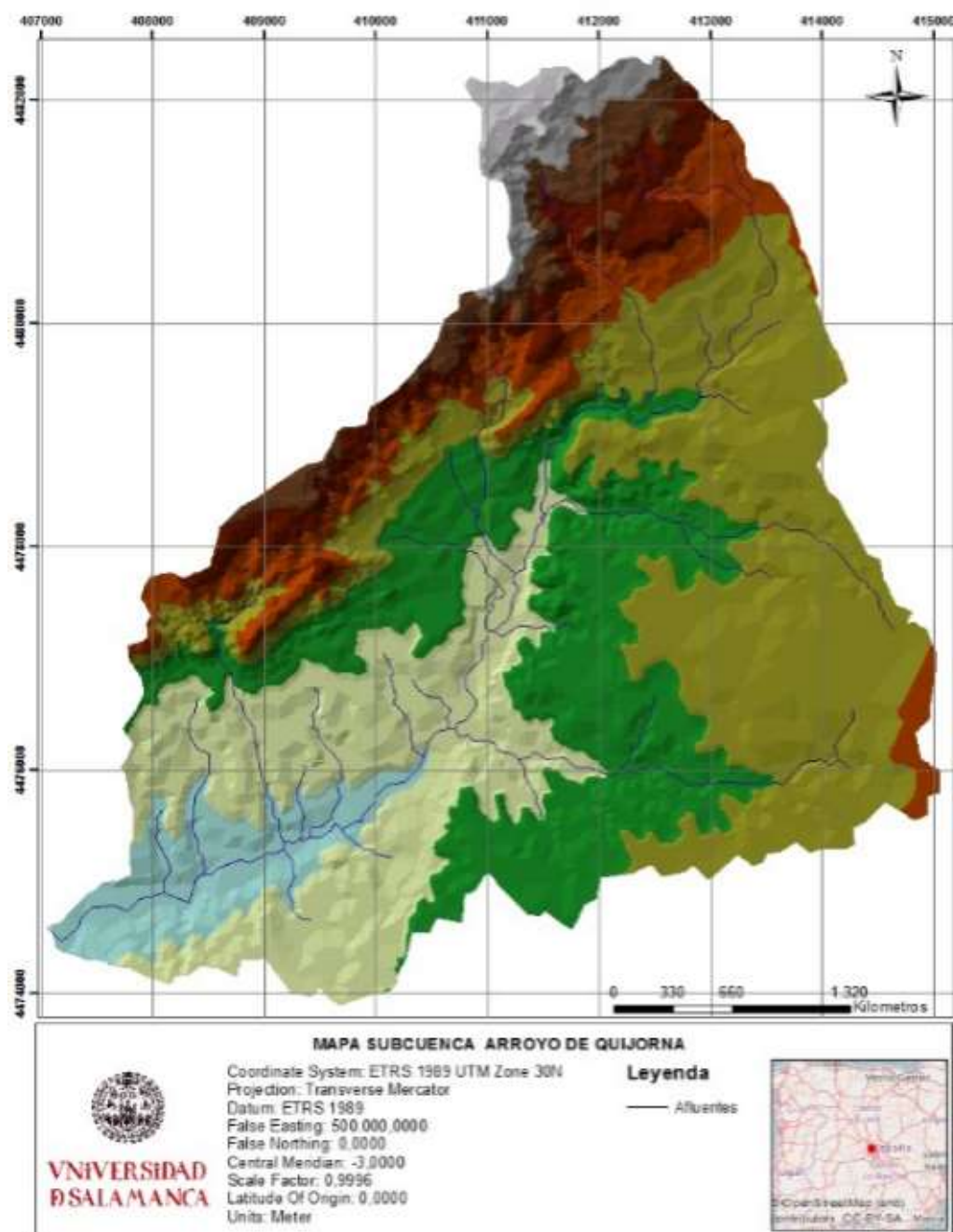
- IGME. (s.f.). *Guía para la elaboración de mapas de inventario y de susceptibilidad de movimientos de ladera a escala 1/50000*. Recuperado el 17 de 04 de 2017, de http://info.igme.es/SidPDF/133000/422/133422_0000006.pdf
- INE. (07 de 2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancitaro*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Jacoby, D. (2001). *Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón*. Recuperado el 24 de 04 de 2017
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana*. Recuperado el 24 de 04 de 2017, de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/lara_mc/sources/lara_mc.pdf
- Lara, M., & Sepulveda, S. (2008). *Remociones en masa*. Chile. Recuperado el 27 de 04 de 2017
- López, P. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24, 93-112. doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212>
- Madrid, C. d. (s.f.). *Atlás. El medio ambiente en la comunidad de Madrid*. Recuperado el 10 de 05 de 2017, de Consejería de Medio Ambiente y ordenación del Territorio: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM003345.pdf>
- Martínez, J., & Balaguer, J. (1998). Litología, aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la comunidad Valenciana. (5). Recuperado el 25 de 04 de 2017, de http://www.habitatge.gva.es/estatico/areas/urbanismo_ordenacion/infadm/publicaciones/pdf/litologia/LITOLOGIACAS.pdf
- Mata, M. (2004). *Recuperando y Analizando Datos Espaciales a través de Web-Mapping*. Recuperado el 28 de 05 de 2017, de <http://migfel.com/Tesis%20migfel%20maestria.pdf>
- Mayorga, R. (03 de 2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en colombia. *Meteorología Colombiana*, 157-168. Recuperado el 01 de 05 de 2017, de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero07/07_17.pdf
- Ministerio de Fomento. (10 de 03 de 2016). *Norma 5.2-IC Drenaje Superficial, de la Instrucción de Carreteras*. Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Montgomery, D. S. (2000). *Forest clearing and regionl landsliding*.
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica. Recuperado el 10 de 05 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/242245217_EVALUACION_DE_LA_SUSCEPTIBILIDAD_AL_DESLIZAMIENTO_DEL_CANTON_DE_SAN_JOSE_PROVINCIA_DE_SAN_JOSE_COSTA_RICA

- Mora, R., & Vahrson, W. (1992). *Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central (CEPRENAC)*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://webserver2.ineter.gob.ni/desliza/estudios/Mora_Vahrson.pdf
- Mora, S., & Vahrson, W. (1994). *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination Bull. Bull. Intl. Ass. Eng. Geology*. Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Moral, L. (06 de 2014). *Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca, mediante un Sistema de Información Geográfica*. Obtenido de http://oa.upm.es/33005/1/TFG_LAURA_MORAL_FERNANDEZ.pdf
- Moreno, M. (2006). *El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/02t.pdf
- Mujica, S., & Pacheco, H. (2013). *Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela*. Recuperado el 08 de 05 de 2017
- Navarro, J. (2012). *Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante SIG en el municipio de Berlín, el Salvador*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://eprints.ucm.es/19876/1/TFM_JNV_FINALCUT.pdf
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de http://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Pietersen, K. (2006). *Multiple criteria decision analysis (MCDA): A tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/5242>
- Remondo, J., González, J., Díaz, J., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chang, J. (2003). Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 437-449. Recuperado el 17 de 04 de 2017
- Reyes, A., Ulises, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Recuperado el 15 de 04 de 2017
- Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(2), 183-219. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24702/2/articulo2.pdf>
- Rodríguez, A., García, E., & Menéndez, R. (2016). *Introducción a los riesgos geológicos* (1 ed.). (J. Lario, & T. Bardají, Edits.) Madrid: UNED.
- Saaty, T. (1994). *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Chapter Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process* (Vol. 3). doi:10.1007/978-94-015-9799-9_2

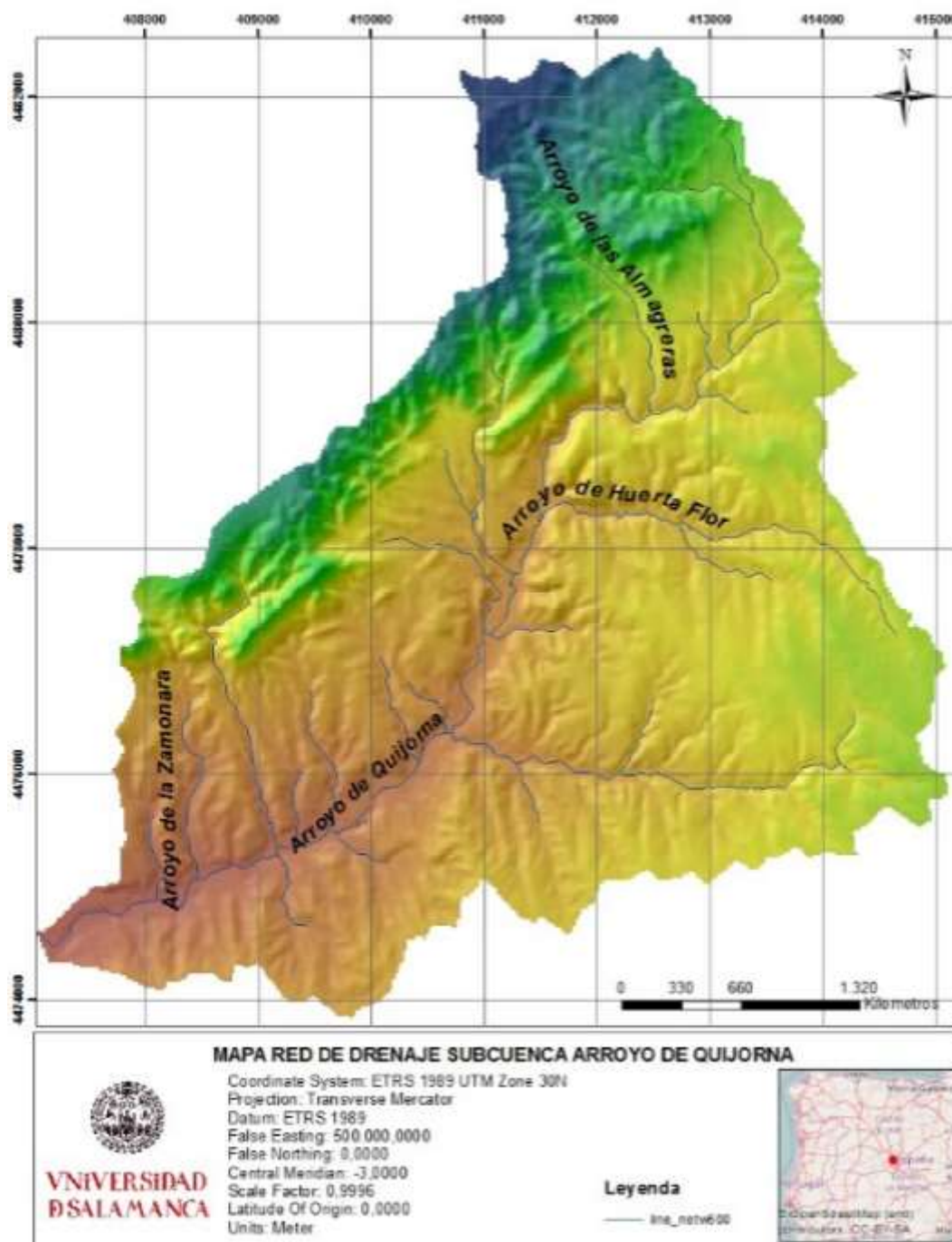
- Saaty, T. a. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* (Vol. 9). New York: McGraw-Hill. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>
- SAGARPA. (2012). *Hidrología aplicada a las pequenas obras hidráulicas*. Recuperado el 11 de 05 de 2017, de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf
- Sánchez, J. (2016). *Hidrología Superficial: Relación precipitación - Escorrentía*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_3.pdf
- SGE. (2004). *Libro Geológico de España*. Recuperado el 13 de 04 de 2017, de http://eprints.ucm.es/5956/1/CAP7_todo.pdf
- Sierra, P. (2013). *Aplicación web para el inventario de presiones en ríos con CartoDB*. Recuperado el 25 de 05 de 2017, de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/18970/1/psierrarTFC0113.pdf>
- Soler, V. (Junio de 2015). *Open Atlas del Sistema de Sanidad Pública de Cataluña*. Recuperado el 25 de 05 de 2017, de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/42929/6/sovivicTFM0615memoria.pdf>
- Sotelo, O. (2013). *Desarrollo de Aplicaciones Web Abiertas para la plataforma Firefox OS*. Recuperado el 27 de 05 de 2017, de http://www.dit.upm.es/~posgrado/doc/TFM/TFMs2012-2013/TFM_Omar_Sotelo_2013.pdf
- Strahler. (1952). *Dynamic basins of geomorphology* (Vol. 63). Bull. Geol. Soc.Am.
- Strahler, A. (1988). *Geografía física*. Barcelona: Omega, Barcelona.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. (I. d. Ltda., Ed.) Bucaramanga. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>
- Tambo, W. (2011). *Estudio del peligro de deslizamiento del norte de la ciudad de Loja, Provincia de Loja. Ecuador*. Recuperado el 22 de 04 de 2017, de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/316/1/T-SENESCYT-0086.pdf>
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez , I. (1991). *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. Recuperado el 15 de 04 de 2017
- Terlien, M. (1998). *The determination of statistical and deterministic hydrological landslide - triggering thresholds*. Environmental Geology 35. Recuperado el 15 de 04 de 2017

- Tveito, O., & Schoner, W. (2002). *Application of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS)*. Klima Report NO. 28/02. Recuperado el 08 de 05 de 2017
- Ubanell, A. (1981). Características principales de la fracturación Tardihercinica en un segmento del sistema central Español. *Cuadernos Geología Ibérica*, 591-605. Recuperado el 25 de 04 de 2017
- ugr. (2012). *Petrología: Rocas sedimentarias*. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm
- UNDRO. (1991). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Recuperado el 12 de 04 de 2017, de <http://www.preventionweb.net/files/resolutions/NL800388.pdf>
- Urquí, L., & Salazar, A. (2009). *Itinerario geológico por la Pedriza del Manzanares*. Recuperado el 25 de 04 de 2017, de http://www.igme.es/patrimonio/descargas/IGME_excursi%C3%B3n_Pedriza_2009.pdf
- Van Westen, C. (2004). *Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments*. Recuperado el 13 de 04 de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/209805623_Geo-Information_tools_for_landslide_risk_assessment_an_overview_of_recent_developments
- Varnes, D. (1978). *Slope movement types and processes*. In: *Landslide analysis and control*, edited by Schuster R. L. and Krizek, R. J. New York: Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Recuperado el 12 de 04 de 2017
- Vásquez, C., Herrera, D., & Gutierrez, Y. (2014). *Caracterización morfométrica de la Cuenca de la quebrada Tatamaco, del municipio Villavieja del departamento del Huila, mediante el uso de la herramienta Hec-Geohms*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1719/2/DOCUMENTO%20FINAL%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Vega, J. (2013). *Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la geomática-Caso aplicado a edificaciones urbanas*. Recuperado el 01 de 05 de 2017, de http://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis_2015/Tesis_Johnny_Vega.pdf
- Viramontes, O., Escoboza, L., Pinedo, C., Pinedo, A., Reyes, V., Román, J., & Pérez, A. (2008). *Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua*. Recuperado el 11 de 05 de 2017, de <http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v1n3/data/5-morfometria-de-la-cuenca.pdf>
- Zubieta, R. (2013). *Modelado Hidrológico distribuido de la cuenca Amazonica peruana utilizando precipitación obtenida por satélite*. Recuperado el 15 de 04 de 2017, de http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2013/Tesis_RZubieta.pdf
- Zuidam, V. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers. Recuperado el 13 de 04 de 2017

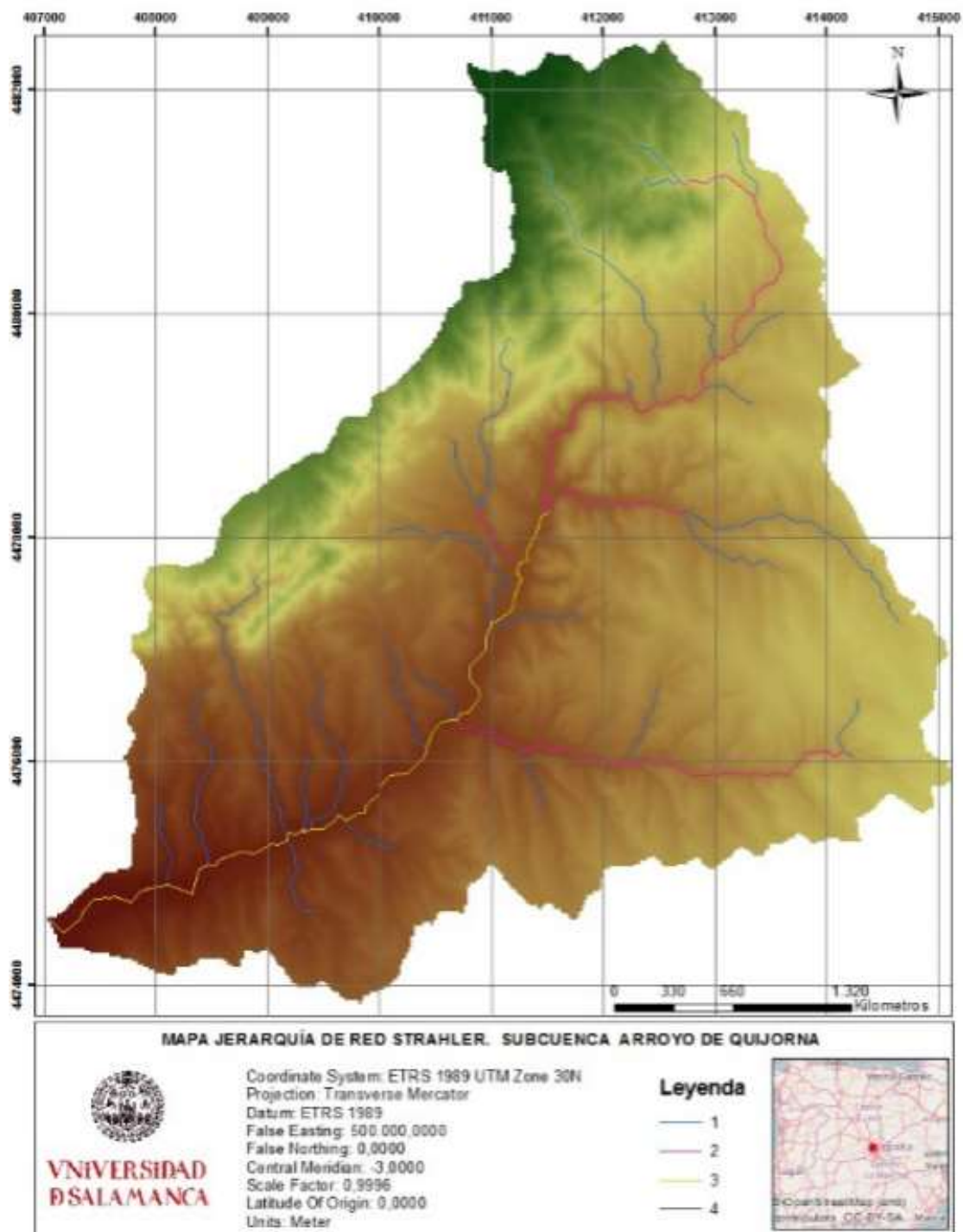
Anexo 1 Mapa subcuenca Arroyo de Quijorna



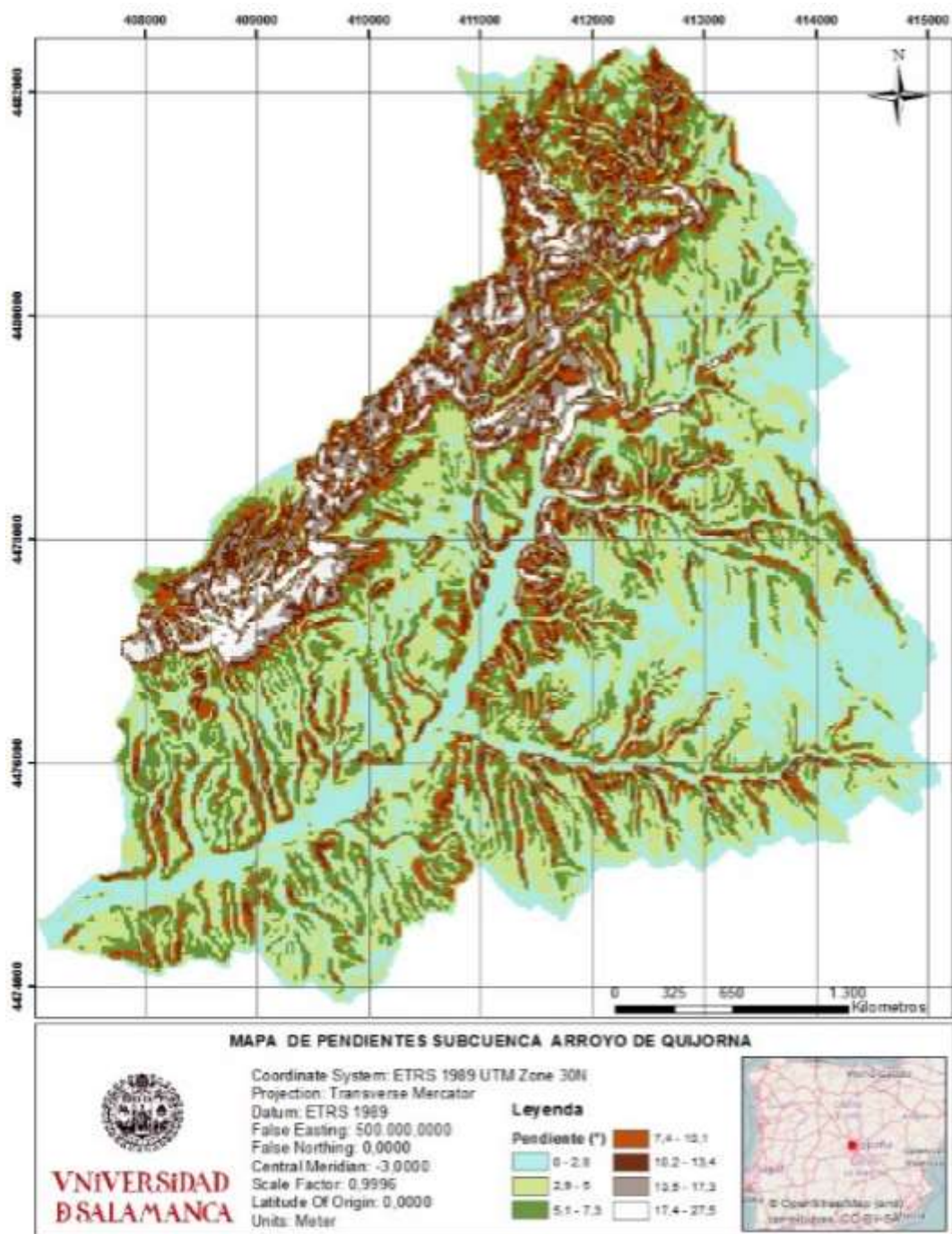
Anexo 2 Mapa Red de drenaje. Subcuenca Arroyo de Quijorna



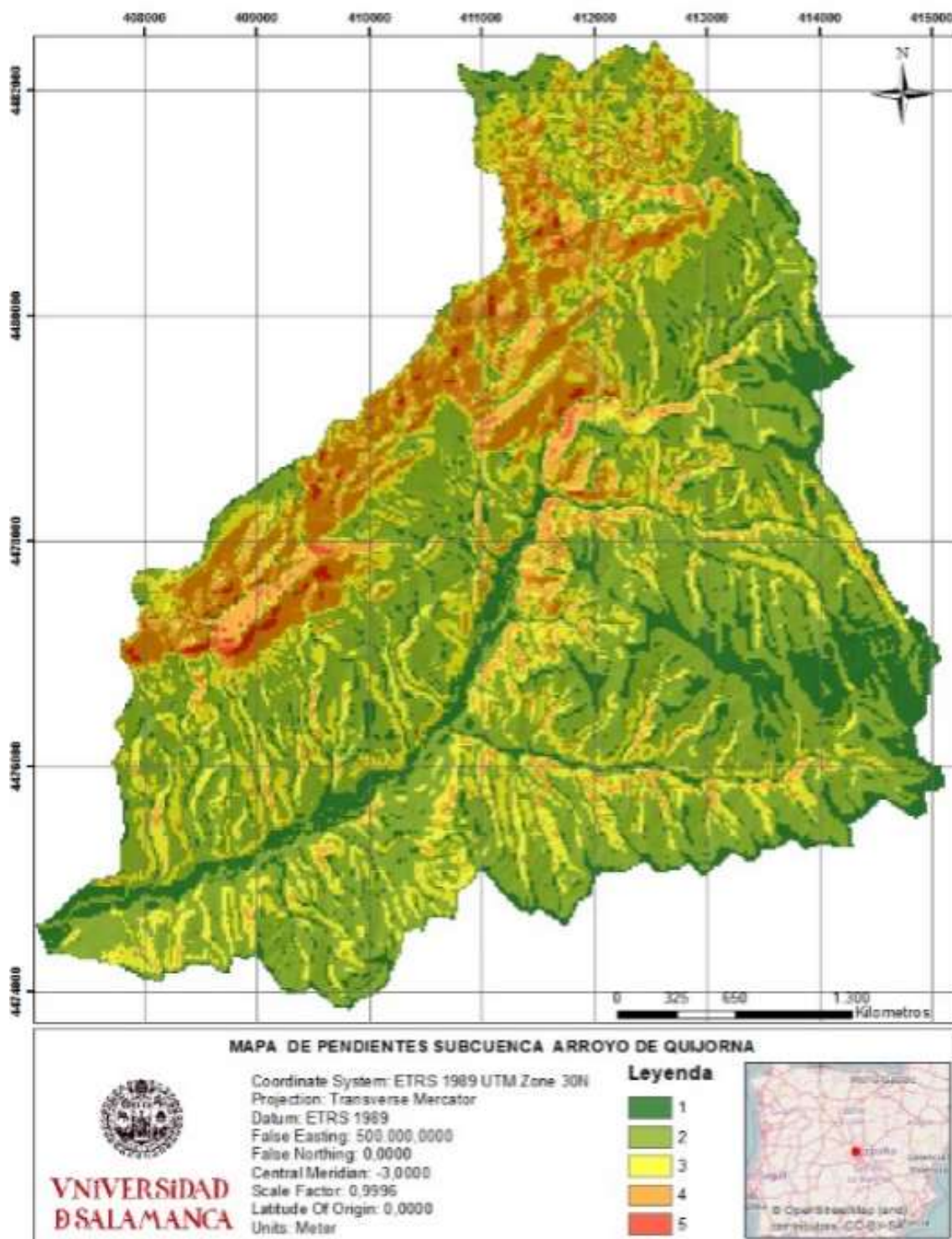
Anexo 3 Mapa jerarquía de red Strahler



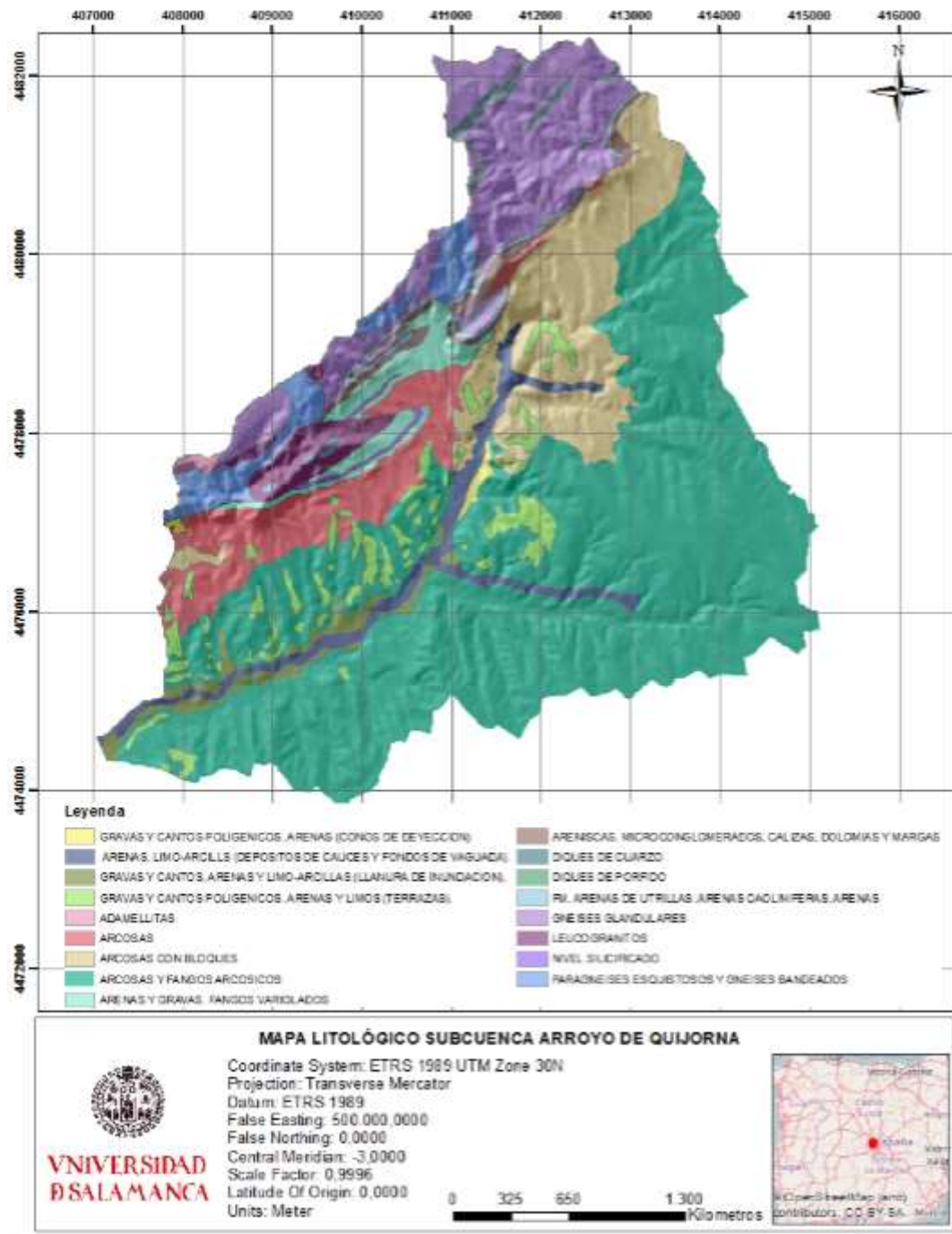
Anexo 4 Mapa de Pendientes, subcuenca Arroyo de Quijorna



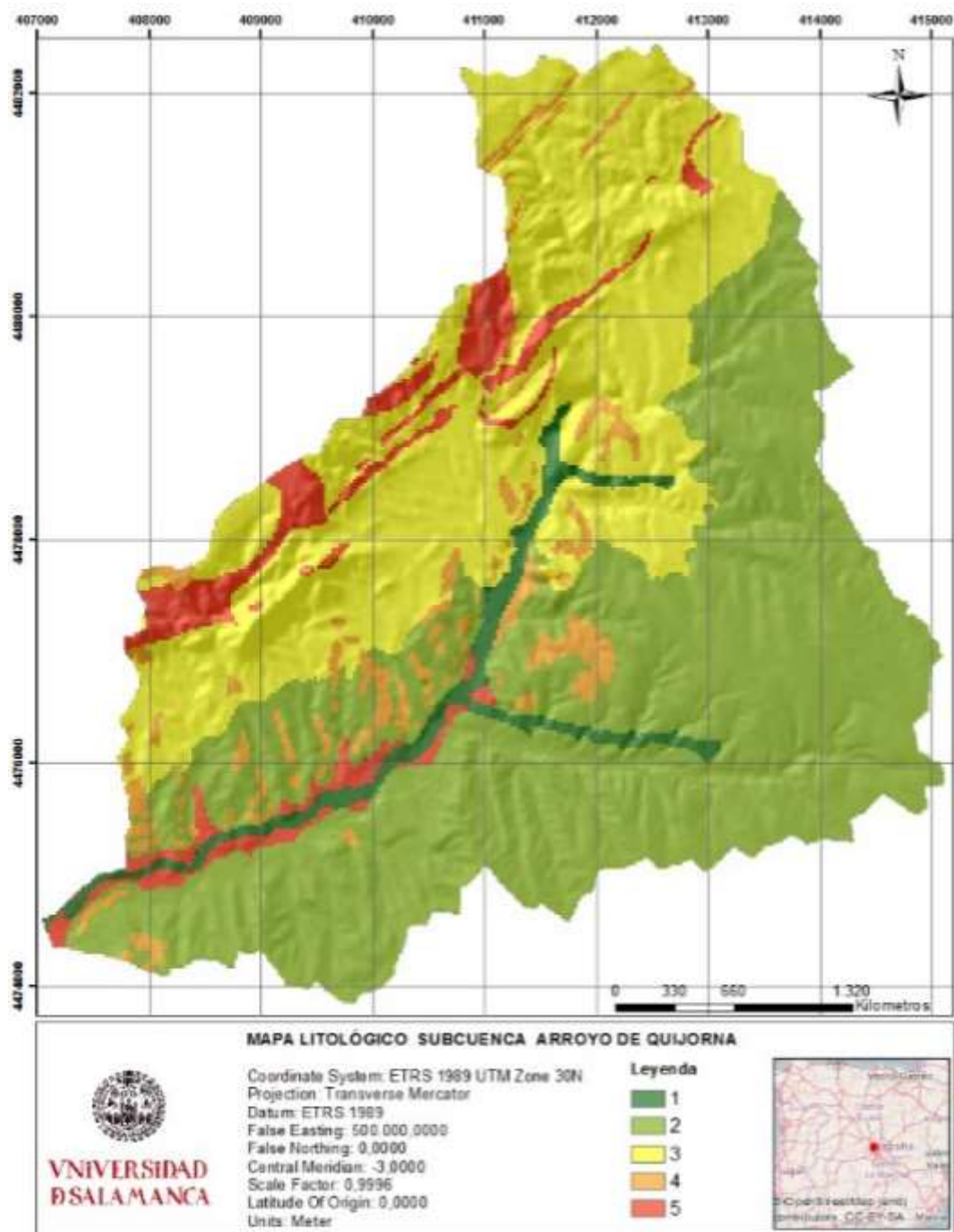
Anexo 5 Mapa de pendientes reclasificado Subcuenca Arroyo de Quijorna



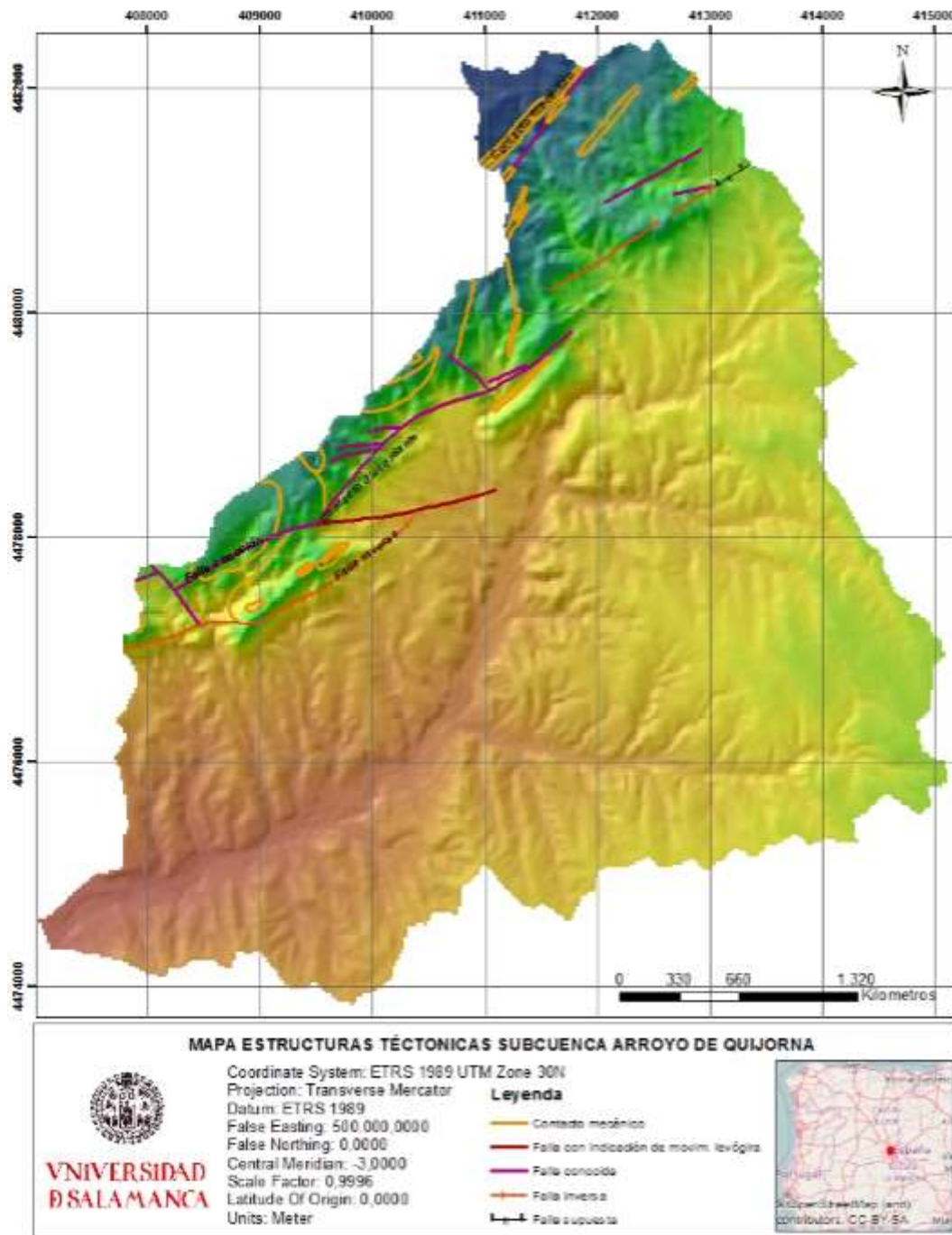
Anexo 6 Mapa litológico, subcuenca Arroyo de Quijorna



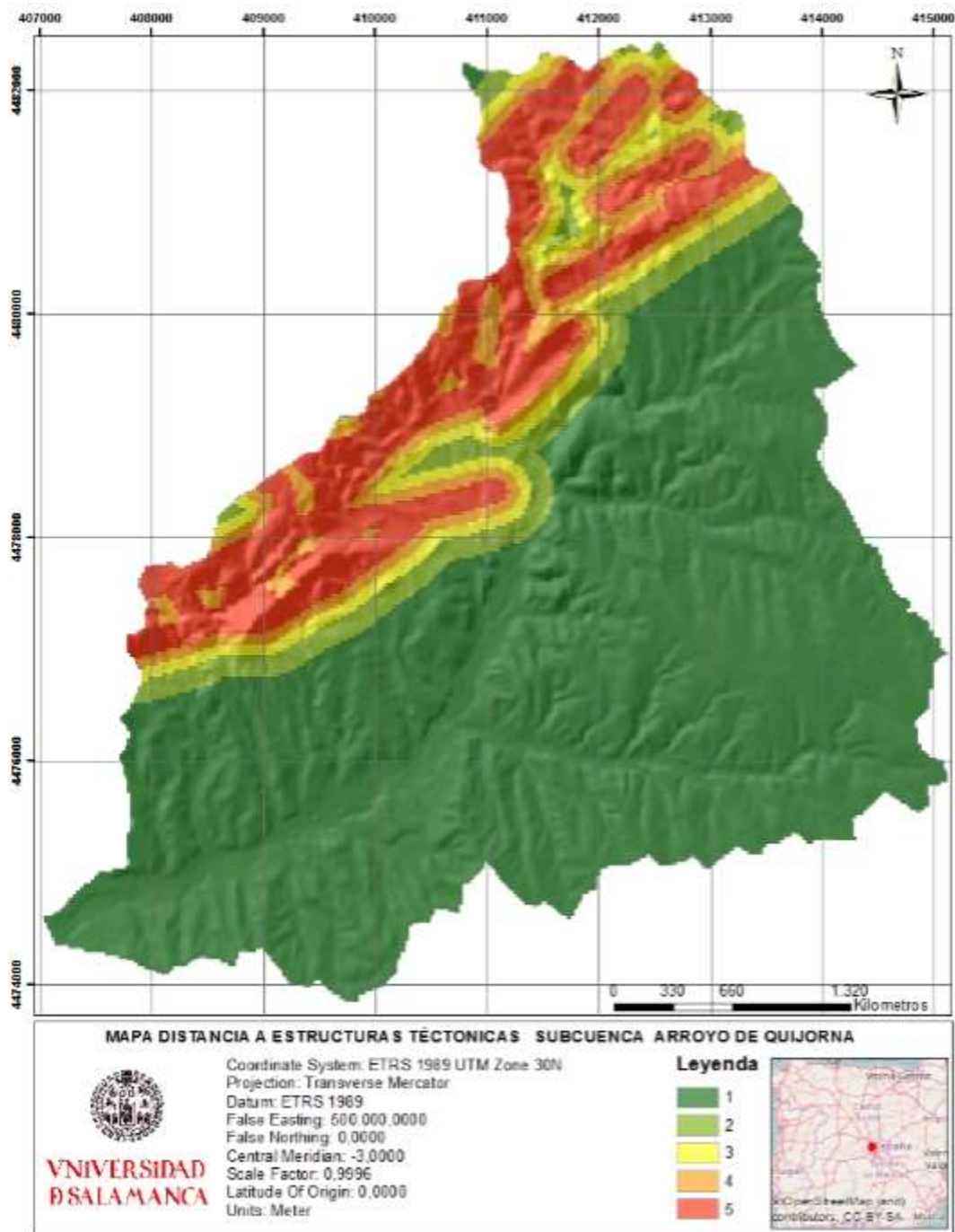
Anexo 7 Mapa litológico reclasificado, subcuenca Arroyo de Quijorna



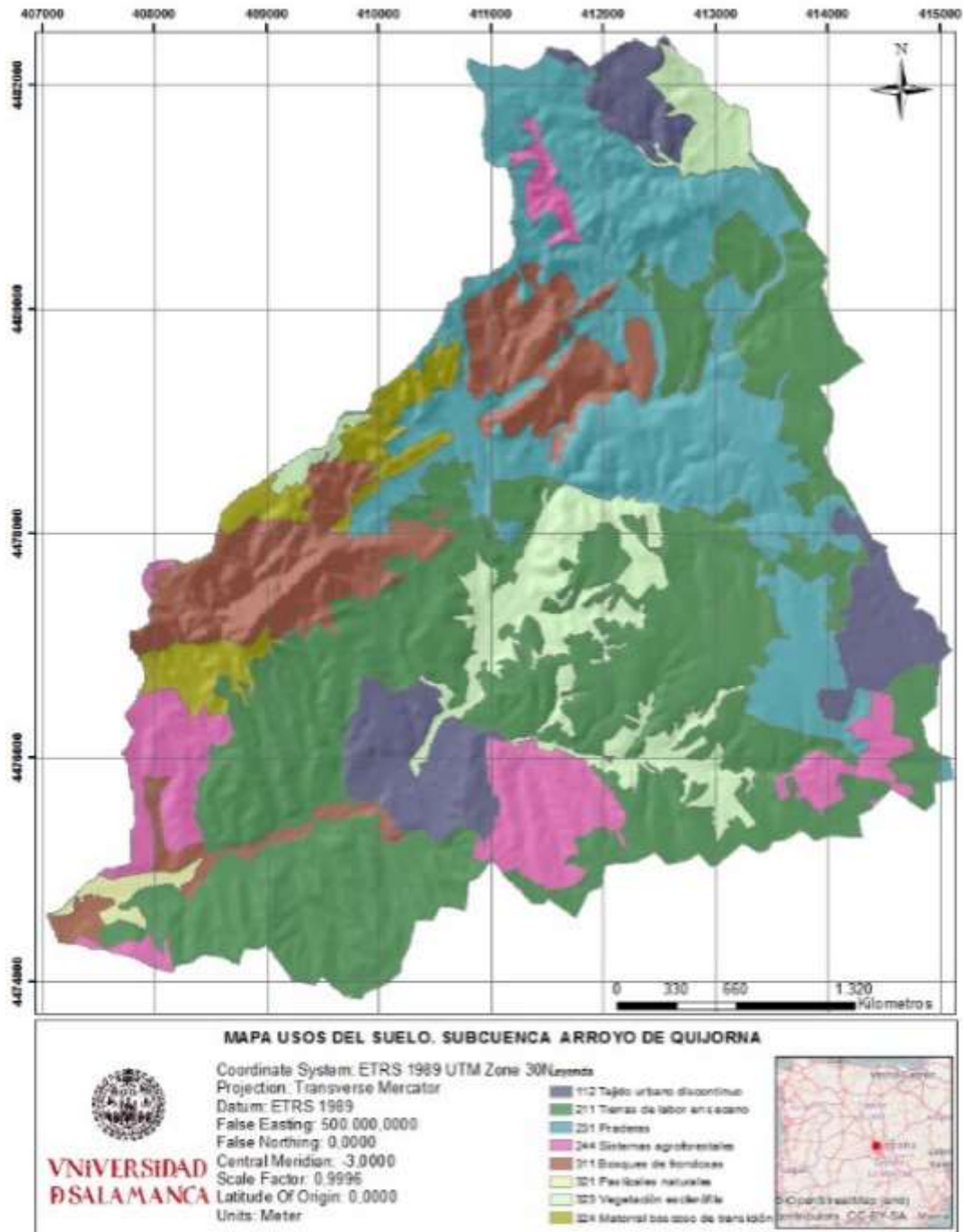
Anexo 8 Mapa estructuras tectónicas, subcuenca Arroyo de Quijorna



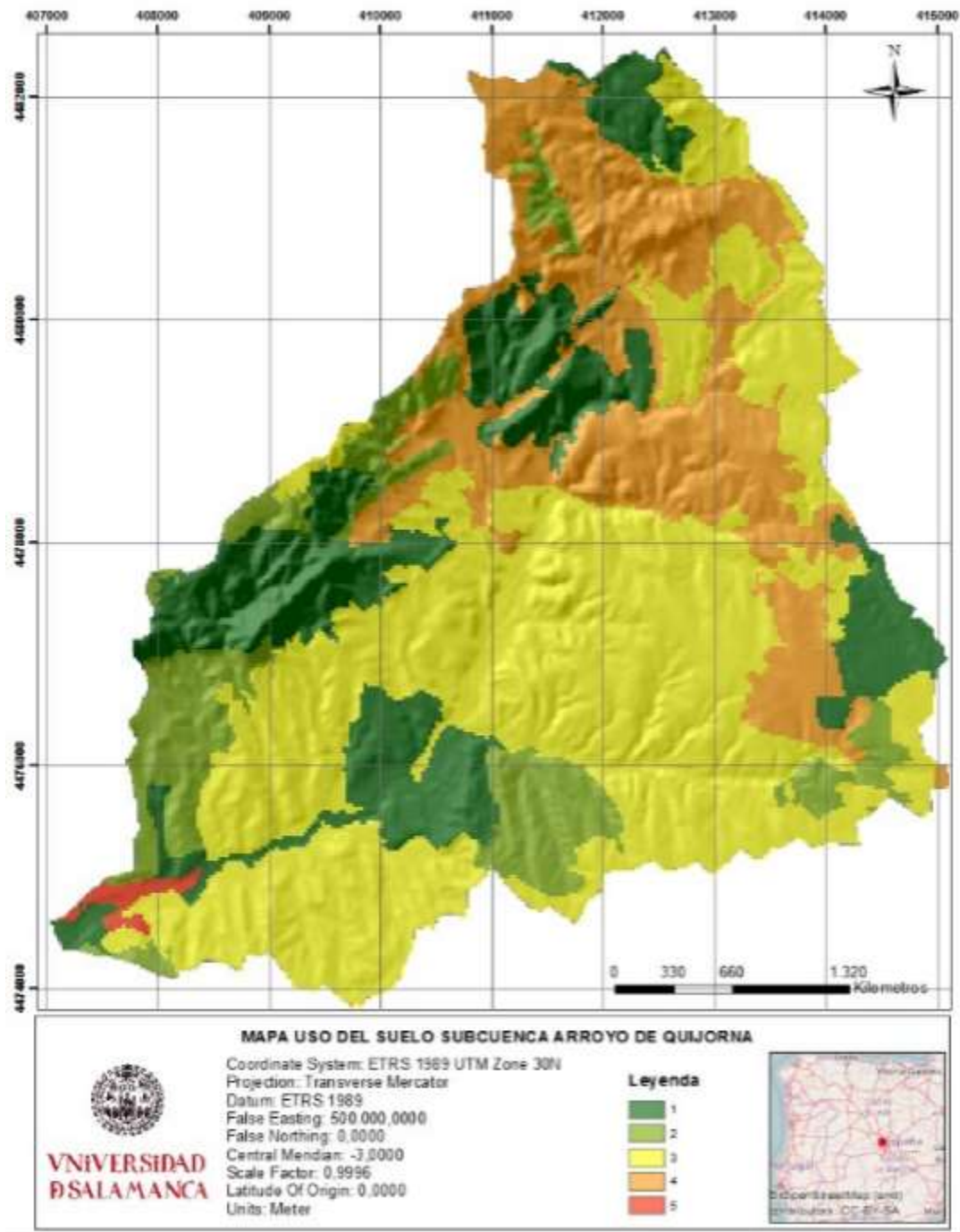
Anexo 9 Mapa estructuras tectónicas reclasificado



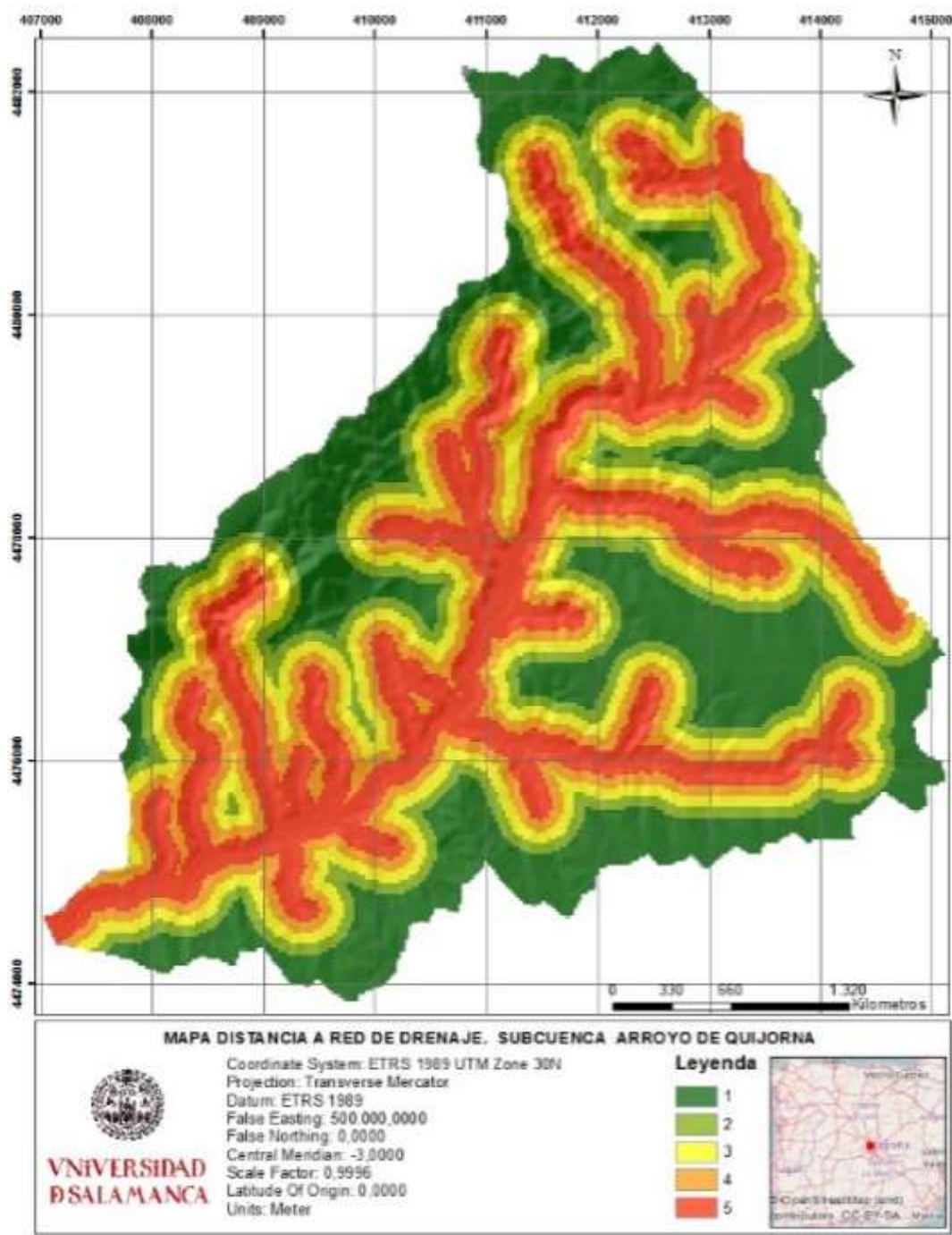
Anexo 10 Mapa usos del suelo, subcuenca Arroyo de Quijorna



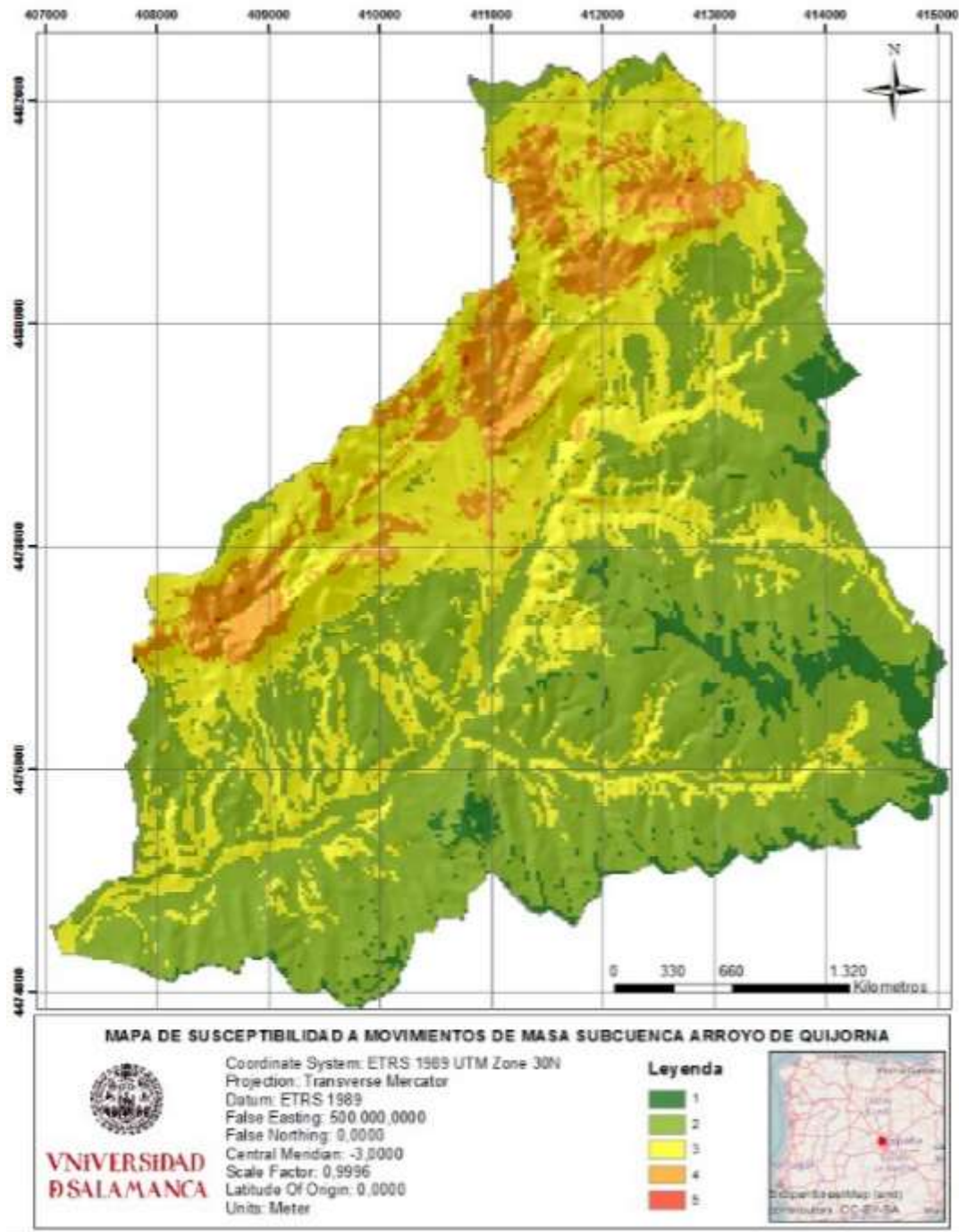
Anexo 11 Mapa usos del suelo reclasificado, subcuenca Arroyo de Quijorna



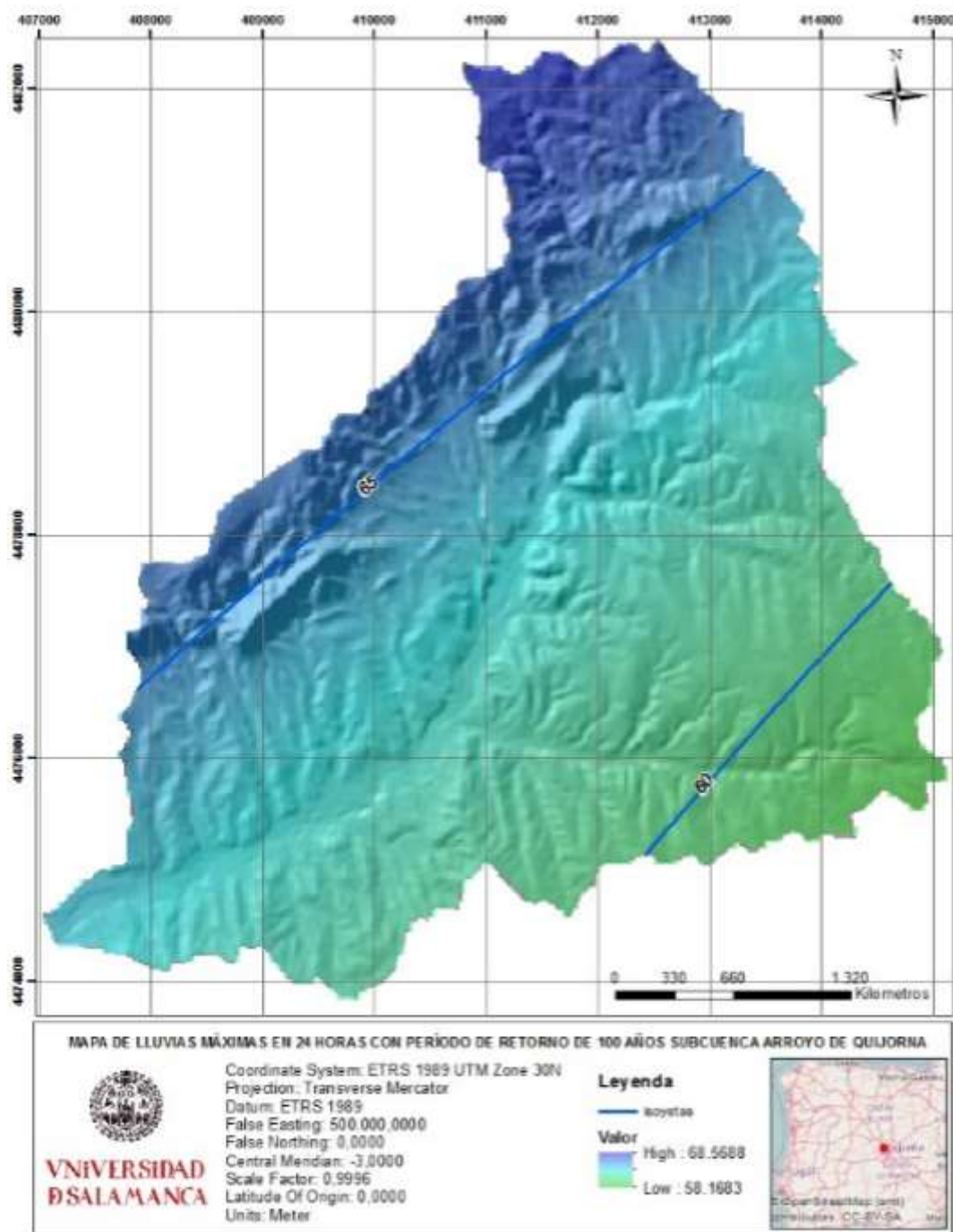
Anexo 12 Mapa distancia a la red de drenaje, subcuenca Arroyo de Quijorna



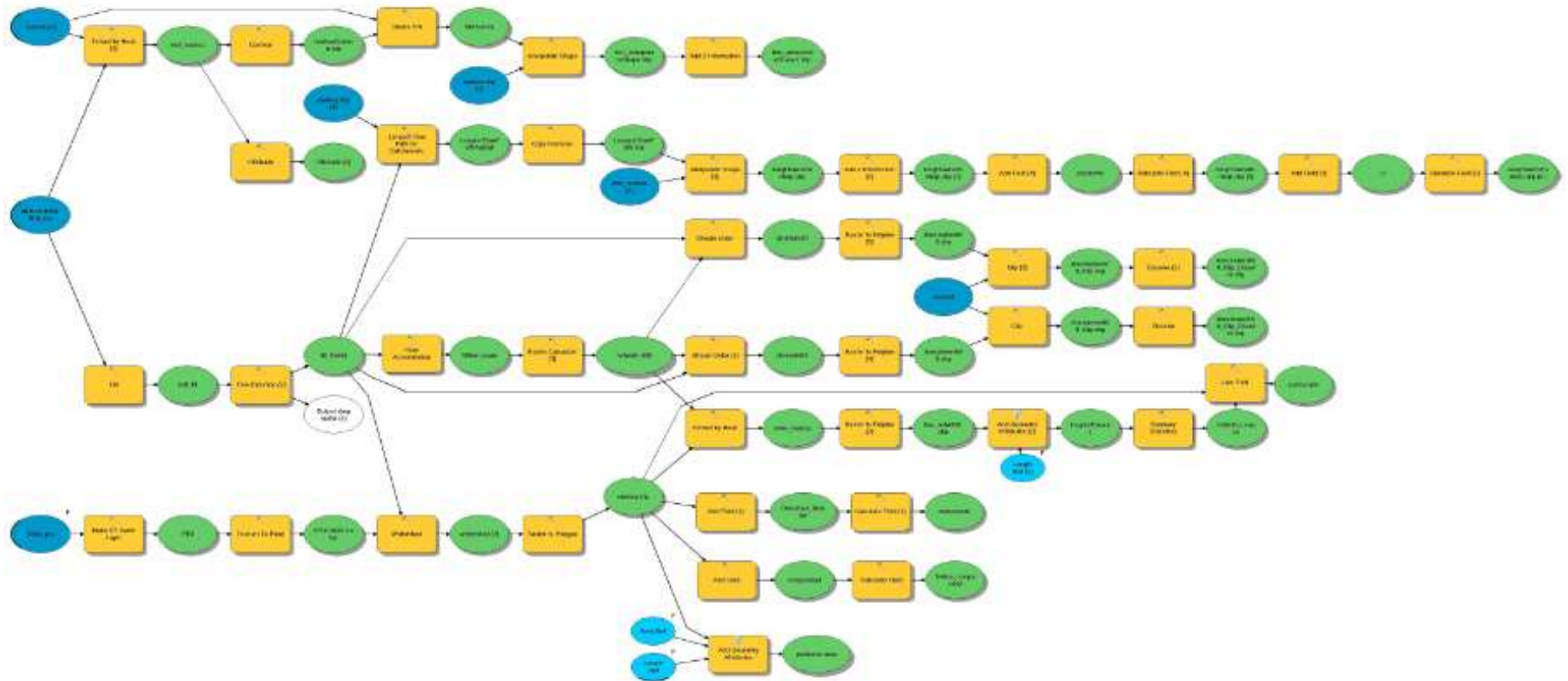
Anexo 13 Mapa Susceptibilidad a movimientos en masa, subcuenca Arroyo de Quijorna



Anexo 14 Mapa de lluvias máximas en 24 horas con período de retorno de 100 años



Anexo 15. Modelo 1



Objetivo:

Este modelo es aplicado para llevar a cabo la delineación de la subcuenca y obtención de la respectiva red de drenaje a partir de un MDT y un punto de aforo.

Notas:

- Los flujos de trabajo en Model Builder usan variables de entrada en color azul, los procesos o herramientas de geoprocésado en color amarillo y las salidas o productos del proceso en color verde.
- Los nombres de las salidas de los procesos realizados, llevan generalmente parte del nombre de la operación, por ejemplo, luego de corregir el MDT con la herramienta fill, la capa de salida se llama mdt_fill
- El Sistema de proyección de las capas usado es: ETRS_1989_UTM_Zone_30N
- Los modelos se explican por partes debido a su complejidad y extensión.

Entradas al modelo:

- MDT25-0558-H30.asc: MDT a escala 1:25000 de la Hoja 558 de MajadaHonda
- Tabla_Pto: Tabla con las coordenadas XY del punto de aforo.

Se parte del MDT de la hoja 558 y mediante *Fill* se rellenan los vacíos en la superficie del ráster. Una vez corregido el MDT mediante *Flow Direction* se crea un ráster con la dirección de flujo hidrológico siguiendo el camino descendiente de un pixel a otro. Con este raster se procede a determinar la cuenca con la herramienta *Watershed*, a definir la red de drenaje con la herramienta *Flow accumulation*, y a calcular el parámetro morfométrico de la longitud del cauce principal mediante la herramienta *Long Flow Path For Catchments*. Ver figura 30.

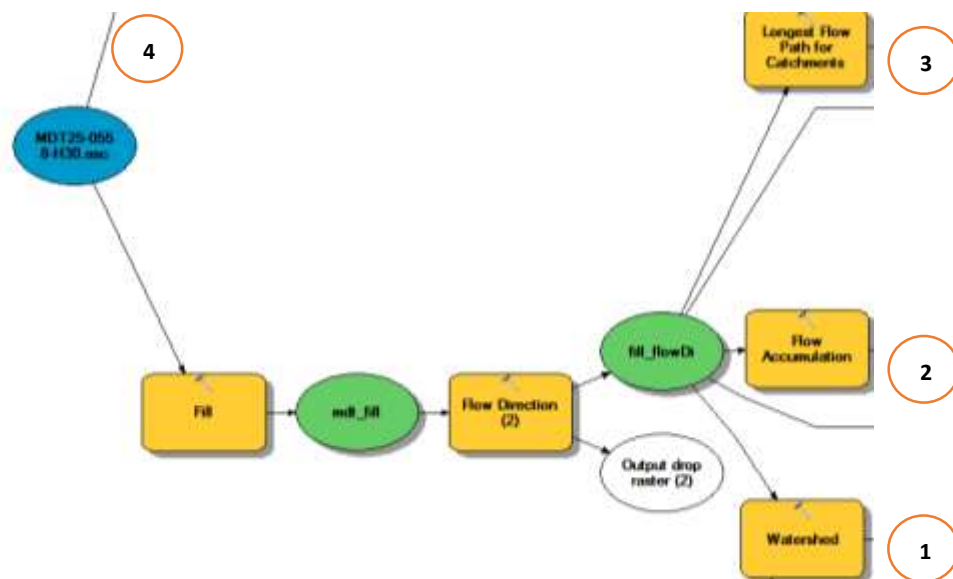


Figura 29. Esquema 1 del Modelo 1

La delineación de la cuenca se realiza con *Watershed*, teniendo como entradas, el raster de dirección de flujo y un punto de aforo del tramo de la corriente en formato shapefile. El punto de aforo proviene de una tabla la cual contiene su respectiva coordenada XY, y mediante *Make XY Event Layer* se crea una capa temporal de dicha entidad, luego esta capa con *Feature to Point* se convierte a shapefile y queda almacenada en el disco. Así la cuenca se delinea hasta dicho punto de salida o desagüe. Esta cuenca resultante en formato raster mediante *Raster To Polygon* se convierte a formato vectorial, para poder así calcular los diferentes parámetros morfométricos. Ver figura 31

Teniendo la cuenca en formato shapefile se aplica *Add Geometry Attributes* para calcular el área y el perímetro de la cuenca, con *Add Field* se agregan campos de atributos de tipo double, para la compacidad y la densidad de drenaje, y con *Calculate Field* se escriben las expresiones matemáticas en lenguaje Python para el cálculo de estos campos creados. Ver figura 32.

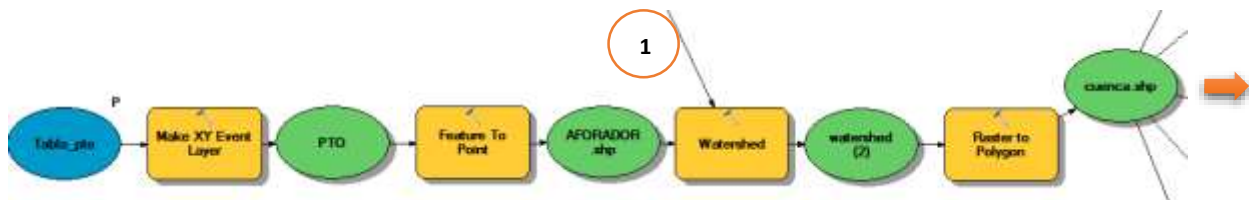


Figura 30. Esquema 2 del Modelo 1

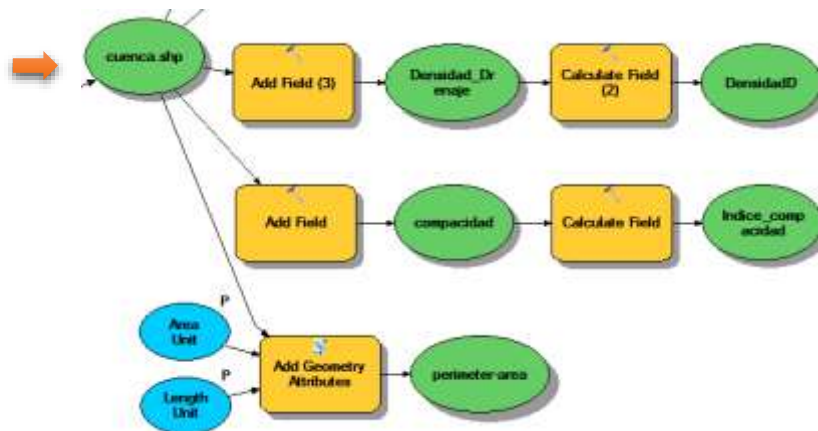


Figura 31. Esquema 3 del Modelo 1

Con el raster de la dirección de flujo como entrada se procede mediante *Flow accumulation* a crear el raster del flujo acumulado, definido como el peso de todos los píxeles que fluyen en cada celda de pendiente descendente. A partir del raster acumulado, con *Raster Calculator* se crea el raster de corrientes, mediante un condicional para píxeles con acumulación de flujo superior a un umbral especificado por el usuario. (Si el valor del umbral es muy alto se modelan drenajes de mayor tamaño). Ver figura 33.

Teniendo definido el raster de la red de drenaje se procede con *Stream Order* a crear un raster del orden de las corrientes, uno con el método *Shreve* y otro con el método *Strahler*. Estos se diferencian entre sí, pues Shreve considera ordenes aditivos (la intersección de un segmento de primer orden, con uno de segundo orden crea un tercer orden), mientras que Strahler no es

aditivo, sino que considera en la intersección de dos cauces, el orden mayor de ellos y lo asigna. Por ello se presenta menor cantidad de ordenes usando la clasificación de Strahler. Esta clasificación jerárquica de redes es importante pues definen comportamientos relacionados al número de cauces, como la razón de bifurcación. Posteriormente, teniendo el orden de la red de drenaje con ambos métodos en formato raster, se procede con *Raster To Polyline* a la conversión a formato vectorial y con un *clip* se ajusta la red de drenaje en formato vectorial a la geometría de la cuenca, finalmente con *dissolve* se resumen las entidades en común a una única entidad, para simplificar los registros de la tabla de atributos, ya que unifica los elementos que tienen la misma propiedad. Ver figura 34.

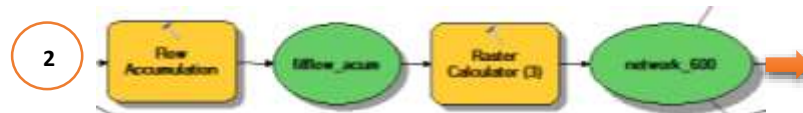


Figura 32. Esquema 4 del Modelo 1

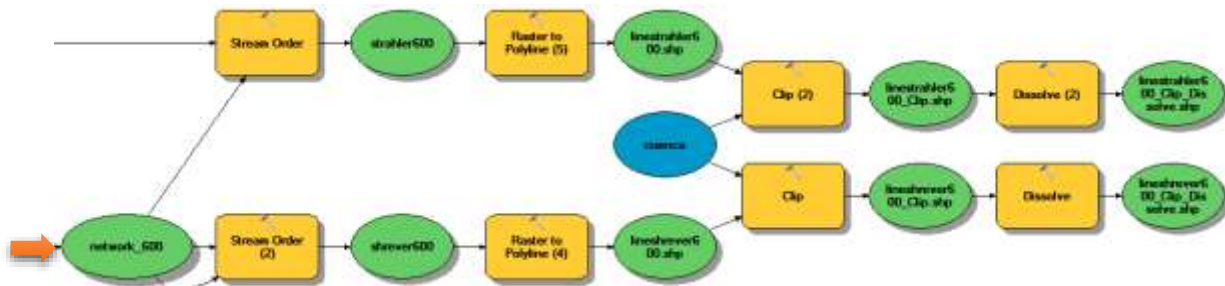


Figura 33. Esquema 5 del Modelo 1

A su vez el raster de la red de drenaje se ajusta a la geometría de la cuenca mediante *Extract by Mask*, con la cual se obtiene el raster de la red de drenaje de la cuenca, usando *Raster to Polyline* se convierte a formato vectorial y con *Add Geometry Attributes* se calcula la longitud de los tramos de la red de drenaje. Posteriormente mediante *Summary Statistics* se obtiene la suma total de cada tramo de la red de drenaje, y dicho valor mediante un *Join Field* se une a la tabla de atributos del shapefile de la cuenca, para ir almacenando en dicha capa todos los parámetros morfométricos. Ver figura 35.

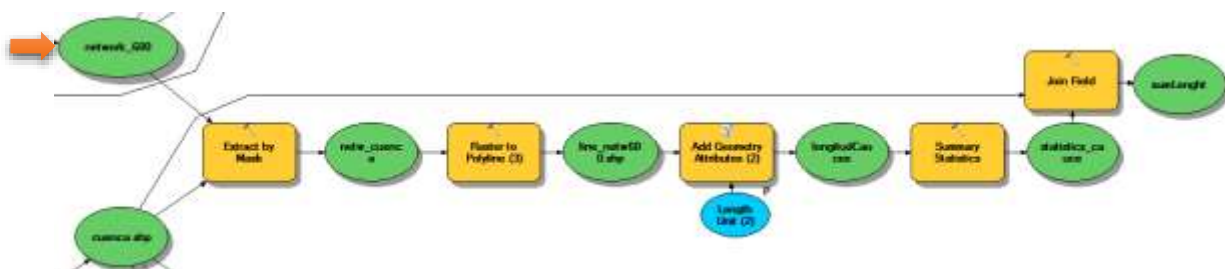


Figura 34. Esquema 6 del Modelo 1

Usando el raster de la dirección de flujo como entrada se procede mediante *Long Flow Path For Catchments* a determinar la longitud del cauce principal, y con *Copy Features* se convierten los datos a una entidad de tipo shapefile. Con este shapefile de la longitud del cauce principal y el

MDT se aplica la herramienta *Interpolate Shape* para dar valores de elevación a la entidad del cauce principal y mediante *Add Z information* se obtienen los valores de las cota máxima y mínima. Ver figura 36.

Luego se aplican dos herramientas *Add field* para agregar los campos de atributos de tipo double llamados pendiente y Tc (tiempo de concentración) y con *Calculate Field* se escriben las correspondientes expresiones matemáticas en lenguaje Python para calcular la pendiente y el Tc. Ver figura 37.

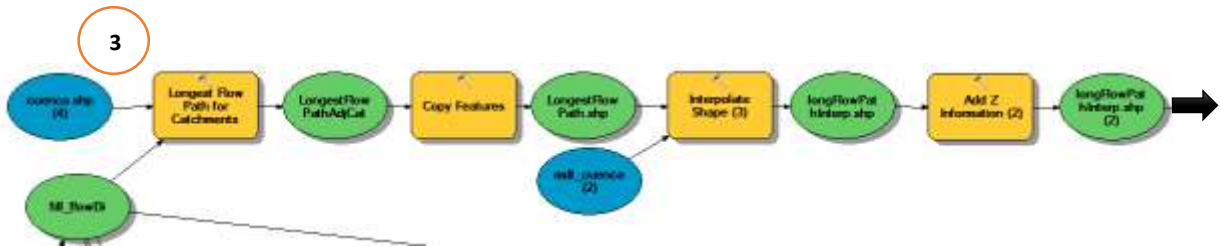


Figura 35. Esquema 7 del Modelo 1

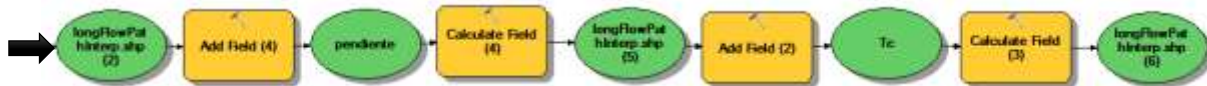


Figura 36. Esquema 8 del Modelo 1

Mediante el MDT y el shapefile de la cuenca se realiza un *Extract By Mask* para obtener el MDT ajustado a la geometría de la cuenca, con este último MDT se aplica *Contour* para obtener las isolíneas de la cuenca y las cuales son la entrada para determinar el TIN (Red de Triangulos Irregulares) mediante la herramienta *Create TIN*. Una vez obtenido se procede a interpolarlo junto con el shapefile de la cuenca, a través de *Interpolate shape* para proporcionar a la cuenca valores de elevación, y con *Add Z information* se agregan los campos de las cotas máxima y mínima y los valores de las pendientes. Ver figura 38.

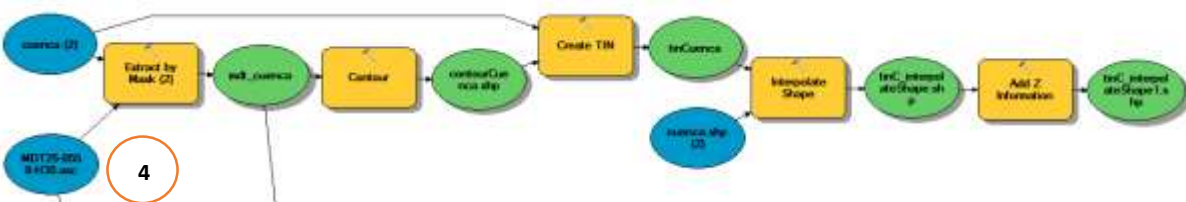
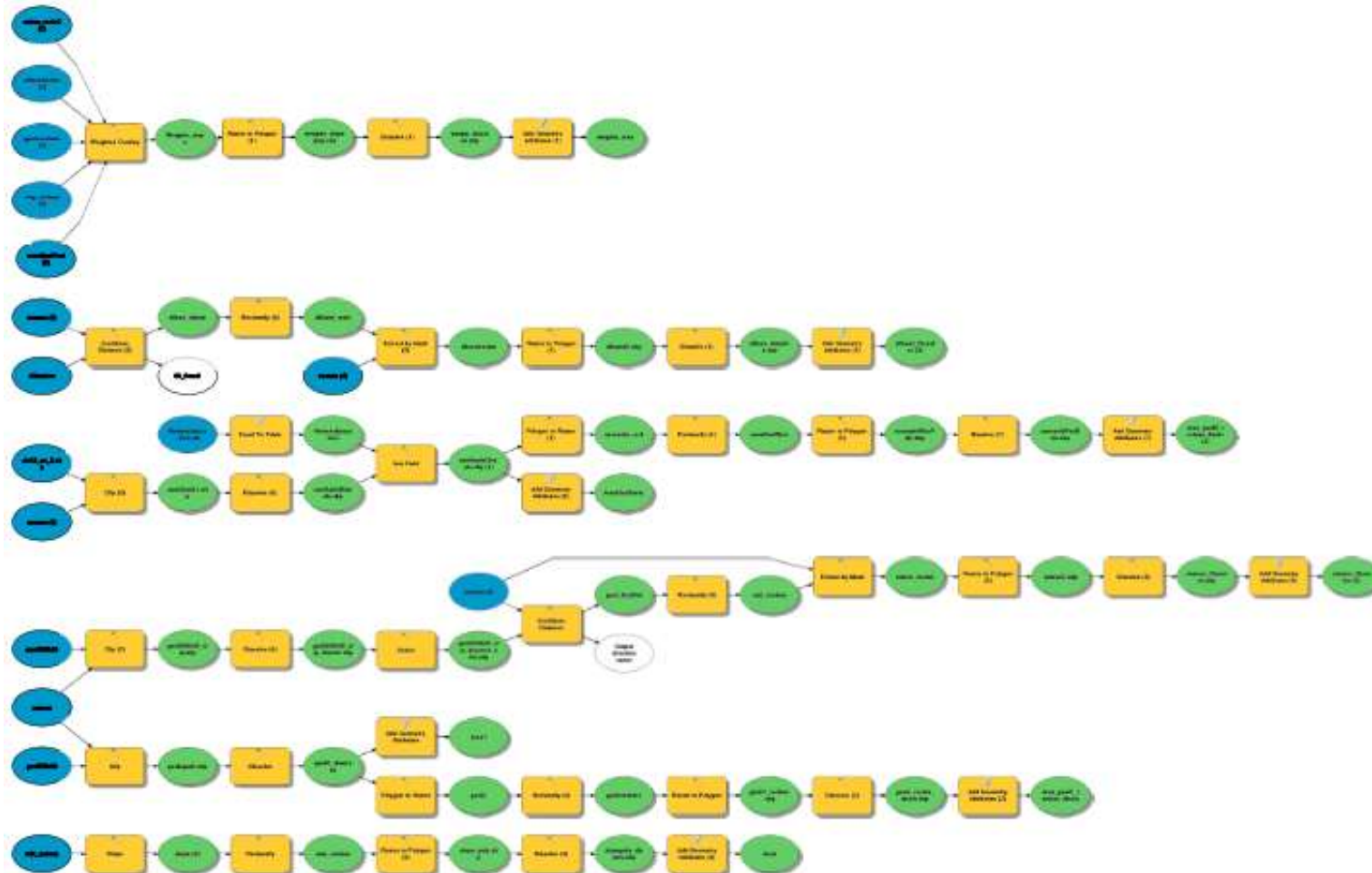


Figura 37. Esquema 9 del Modelo 1

Anexo 16 Modelo 2



Objetivo:

Este modelo es aplicado para la clasificación de los factores condicionantes y obtención de la susceptibilidad en la subcuenca.

Entradas:

- mdt_cuenca: Es el MDT de la cuenca obtenido a partir del Modelo 1.
- geo558h30: Capa litológica de la hoja 558 en formato shapefile proveniente del Instituto Geológico y Minero de España
- geol558h30: Capa de las estructuras lineales de la hoja 558 en formato shapefile proveniente del Instituto Geológico y Minero de España
- clc12_es_2: Capa Corine Land Cover de la hoja 558 en formato shapefile del Instituto Geográfico Nacional IGN – Centro Nacional de Información Geográfica
- Nomenclatura_CLC: Tabla de los códigos y los correspondientes nombres según leyenda Corine Land Cover en formato Excel del Instituto Geográfico Nacional IGN – Centro Nacional de Información Geográfica
- Cuenca: cuenca en formato shapefile, obtenido a partir del Modelo 1.
- Afluentes: Red de drenaje o afluentes e formato shapefile, obtenido a partir de Modelo 1.

A continuación, se muestra el flujo de procesos para la determinación de cada factor condicionante.

Determinación de la pendiente:

Partiendo del MDT de la cuenca mediante *Slope* se determina el raster de las pendientes en la cuenca, luego con *Reclassify* se otorgan valores de 1 a 5 (de muy baja a muy alta susceptibilidad) y dicho raster reclasificado se convierte a formato shapefile mediante *Raster to Polygon* y posteriormente se aplica *Dissolve* para disolver las entidades en común a una única entidad y reducir así la repetición en los registros de la tabla de atributos. Luego con *Add Geometry Attributes* se asigna a la capa, un campo con el área que representa cada clase de susceptibilidad en la cuenca. Ver figura 39.



Figura 38. Esquema 1 del modelo 2

Se realiza un *Clip* o corte de la capa litológica (geo558h30) de acuerdo a la geometría de la subcuenca, posteriormente con *Dissolve* se reducen las entidades en común y a esa capa de salida con *Add Geometry Attributes* se le añade el campo y valor del área de cada litología presente en la cuenca. Luego la capa se convierte mediante *Polygon To Raster* a formato Raster. Ver figura 40.

Determinación de la litología:

Dicho formato raster de la litología mediante *Reclassify* se reclasifica de 1 a 5 de acuerdo al grado de susceptibilidad. Con el raster reclasificado Mediante *Raster To Polygon* y *Dissolve* se convierte a

formato vector y se disuelven los campos en común generados, para poder aplicar *Add Geometry Attributes* y obtener el área de cada grado de susceptibilidad en la cuenca. Ver figura 41.

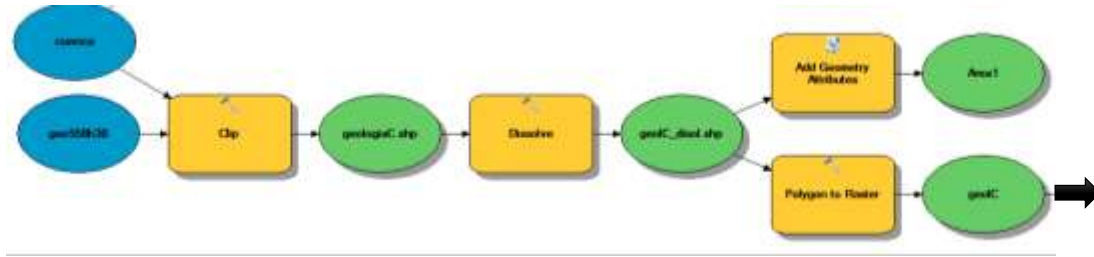


Figura 39. Esquema 2 del modelo 2



Figura 40. Esquema 3 del modelo 2

Determinación de la influencia de las estructuras o fallas:

Teniendo la capa de estructuras (geol558h30) se realiza un *clip* con la cuenca, para obtener las estructuras de la cuenca. Dicha capa se disuelve con *Dissolve*, y se aplica un *Select* para realizar una consulta y seleccionar así, únicamente las “fallas” y evitar que entren más campos como por ejemplo “contactos”. Ver figura 42.

Luego con la capa resultante del select se aplica *Euclidean Distance* para calcular la distancia desde cada pixel del ráster hasta el origen más cercano y teniendo así las distancias de influencia se realiza la reclasificación con *Reclassify* de 1 a 5 de acuerdo al grado de susceptibilidad, siendo más alto el grado en distancias más próximas a las fallas. Este resultado de la reclasificación con *Extract by Mask* se ajusta para obtener las influencias de las fallas dentro de los límites de la cuenca. Luego se convierte a shapefile, se disuelven los campos en común y se agrega la geometría para obtener el área de cada grado de susceptibilidad. Ver figura 43.

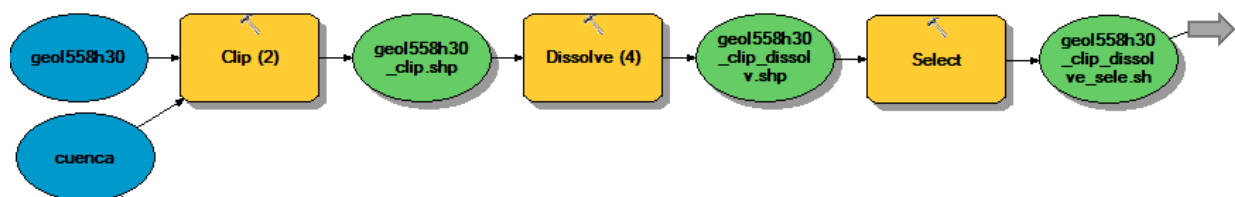
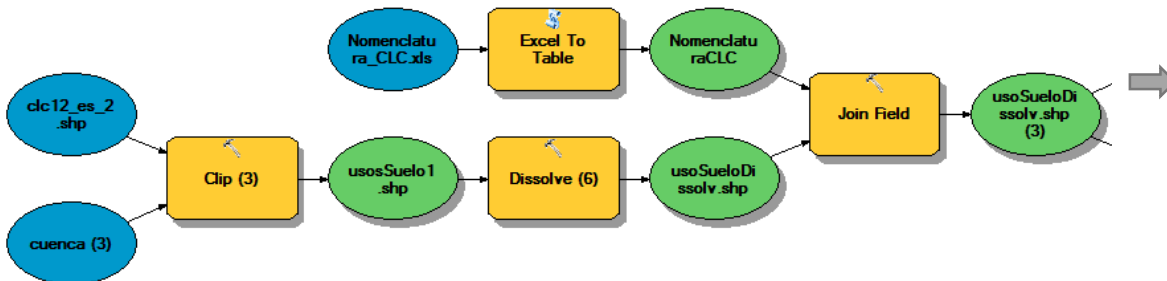


Figura 41 Esquema 4 del Modelo 2



```

graph LR
    Input[usa2010census.shp] --> P2R[Polygon to Raster (2)]
    P2R --> usausufile[usausufile]
    usausufile --> R4[Reclassify (4)]
    R4 --> usausufile2[usausufile2]
    usausufile2 --> R4P[Raster to Polygon (4)]
    R4P --> usausufile3[usausufile3]
    usausufile3 --> Dissolve[7]
    Dissolve --> usausufile4[usausufile4]
    usausufile4 --> AddGeom1[Add Geometry Attributes (7)]
    AddGeom1 --> usausufile5[usausufile5]
    usausufile5 --> AddGeom2[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom2 --> usausufile6[usausufile6]
    usausufile6 --> Area[AreaUsaSu]
    Area --> usausufile7[usausufile7]
    usausufile7 --> AddGeom3[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom3 --> usausufile8[usausufile8]
    usausufile8 --> Area2[AreaUsaSu]
    Area2 --> usausufile9[usausufile9]
    usausufile9 --> AddGeom4[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom4 --> usausufile10[usausufile10]
    usausufile10 --> Area3[AreaUsaSu]
    Area3 --> usausufile11[usausufile11]
    usausufile11 --> AddGeom5[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom5 --> usausufile12[usausufile12]
    usausufile12 --> Area4[AreaUsaSu]
    Area4 --> usausufile13[usausufile13]
    usausufile13 --> AddGeom6[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom6 --> usausufile14[usausufile14]
    usausufile14 --> Area5[AreaUsaSu]
    Area5 --> usausufile15[usausufile15]
    usausufile15 --> AddGeom7[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom7 --> usausufile16[usausufile16]
    usausufile16 --> Area6[AreaUsaSu]
    Area6 --> usausufile17[usausufile17]
    usausufile17 --> AddGeom8[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom8 --> usausufile18[usausufile18]
    usausufile18 --> Area7[AreaUsaSu]
    Area7 --> usausufile19[usausufile19]
    usausufile19 --> AddGeom9[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom9 --> usausufile20[usausufile20]
    usausufile20 --> Area8[AreaUsaSu]
    Area8 --> usausufile21[usausufile21]
    usausufile21 --> AddGeom10[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom10 --> usausufile22[usausufile22]
    usausufile22 --> Area9[AreaUsaSu]
    Area9 --> usausufile23[usausufile23]
    usausufile23 --> AddGeom11[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom11 --> usausufile24[usausufile24]
    usausufile24 --> Area10[AreaUsaSu]
    Area10 --> usausufile25[usausufile25]
    usausufile25 --> AddGeom12[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom12 --> usausufile26[usausufile26]
    usausufile26 --> Area11[AreaUsaSu]
    Area11 --> usausufile27[usausufile27]
    usausufile27 --> AddGeom13[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom13 --> usausufile28[usausufile28]
    usausufile28 --> Area12[AreaUsaSu]
    Area12 --> usausufile29[usausufile29]
    usausufile29 --> AddGeom14[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom14 --> usausufile30[usausufile30]
    usausufile30 --> Area13[AreaUsaSu]
    Area13 --> usausufile31[usausufile31]
    usausufile31 --> AddGeom15[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom15 --> usausufile32[usausufile32]
    usausufile32 --> Area14[AreaUsaSu]
    Area14 --> usausufile33[usausufile33]
    usausufile33 --> AddGeom16[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom16 --> usausufile34[usausufile34]
    usausufile34 --> Area15[AreaUsaSu]
    Area15 --> usausufile35[usausufile35]
    usausufile35 --> AddGeom17[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom17 --> usausufile36[usausufile36]
    usausufile36 --> Area16[AreaUsaSu]
    Area16 --> usausufile37[usausufile37]
    usausufile37 --> AddGeom18[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom18 --> usausufile38[usausufile38]
    usausufile38 --> Area17[AreaUsaSu]
    Area17 --> usausufile39[usausufile39]
    usausufile39 --> AddGeom19[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom19 --> usausufile40[usausufile40]
    usausufile40 --> Area18[AreaUsaSu]
    Area18 --> usausufile41[usausufile41]
    usausufile41 --> AddGeom20[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom20 --> usausufile42[usausufile42]
    usausufile42 --> Area19[AreaUsaSu]
    Area19 --> usausufile43[usausufile43]
    usausufile43 --> AddGeom21[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom21 --> usausufile44[usausufile44]
    usausufile44 --> Area20[AreaUsaSu]
    Area20 --> usausufile45[usausufile45]
    usausufile45 --> AddGeom22[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom22 --> usausufile46[usausufile46]
    usausufile46 --> Area21[AreaUsaSu]
    Area21 --> usausufile47[usausufile47]
    usausufile47 --> AddGeom23[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom23 --> usausufile48[usausufile48]
    usausufile48 --> Area22[AreaUsaSu]
    Area22 --> usausufile49[usausufile49]
    usausufile49 --> AddGeom24[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom24 --> usausufile50[usausufile50]
    usausufile50 --> Area23[AreaUsaSu]
    Area23 --> usausufile51[usausufile51]
    usausufile51 --> AddGeom25[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom25 --> usausufile52[usausufile52]
    usausufile52 --> Area24[AreaUsaSu]
    Area24 --> usausufile53[usausufile53]
    usausufile53 --> AddGeom26[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom26 --> usausufile54[usausufile54]
    usausufile54 --> Area25[AreaUsaSu]
    Area25 --> usausufile55[usausufile55]
    usausufile55 --> AddGeom27[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom27 --> usausufile56[usausufile56]
    usausufile56 --> Area26[AreaUsaSu]
    Area26 --> usausufile57[usausufile57]
    usausufile57 --> AddGeom28[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom28 --> usausufile58[usausufile58]
    usausufile58 --> Area27[AreaUsaSu]
    Area27 --> usausufile59[usausufile59]
    usausufile59 --> AddGeom29[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom29 --> usausufile60[usausufile60]
    usausufile60 --> Area28[AreaUsaSu]
    Area28 --> usausufile61[usausufile61]
    usausufile61 --> AddGeom30[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom30 --> usausufile62[usausufile62]
    usausufile62 --> Area29[AreaUsaSu]
    Area29 --> usausufile63[usausufile63]
    usausufile63 --> AddGeom31[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom31 --> usausufile64[usausufile64]
    usausufile64 --> Area30[AreaUsaSu]
    Area30 --> usausufile65[usausufile65]
    usausufile65 --> AddGeom32[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom32 --> usausufile66[usausufile66]
    usausufile66 --> Area31[AreaUsaSu]
    Area31 --> usausufile67[usausufile67]
    usausufile67 --> AddGeom33[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom33 --> usausufile68[usausufile68]
    usausufile68 --> Area32[AreaUsaSu]
    Area32 --> usausufile69[usausufile69]
    usausufile69 --> AddGeom34[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom34 --> usausufile70[usausufile70]
    usausufile70 --> Area33[AreaUsaSu]
    Area33 --> usausufile71[usausufile71]
    usausufile71 --> AddGeom35[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom35 --> usausufile72[usausufile72]
    usausufile72 --> Area34[AreaUsaSu]
    Area34 --> usausufile73[usausufile73]
    usausufile73 --> AddGeom36[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom36 --> usausufile74[usausufile74]
    usausufile74 --> Area35[AreaUsaSu]
    Area35 --> usausufile75[usausufile75]
    usausufile75 --> AddGeom37[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom37 --> usausufile76[usausufile76]
    usausufile76 --> Area36[AreaUsaSu]
    Area36 --> usausufile77[usausufile77]
    usausufile77 --> AddGeom38[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom38 --> usausufile78[usausufile78]
    usausufile78 --> Area37[AreaUsaSu]
    Area37 --> usausufile79[usausufile79]
    usausufile79 --> AddGeom39[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom39 --> usausufile80[usausufile80]
    usausufile80 --> Area38[AreaUsaSu]
    Area38 --> usausufile81[usausufile81]
    usausufile81 --> AddGeom40[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom40 --> usausufile82[usausufile82]
    usausufile82 --> Area39[AreaUsaSu]
    Area39 --> usausufile83[usausufile83]
    usausufile83 --> AddGeom41[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom41 --> usausufile84[usausufile84]
    usausufile84 --> Area40[AreaUsaSu]
    Area40 --> usausufile85[usausufile85]
    usausufile85 --> AddGeom42[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom42 --> usausufile86[usausufile86]
    usausufile86 --> Area41[AreaUsaSu]
    Area41 --> usausufile87[usausufile87]
    usausufile87 --> AddGeom43[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom43 --> usausufile88[usausufile88]
    usausufile88 --> Area42[AreaUsaSu]
    Area42 --> usausufile89[usausufile89]
    usausufile89 --> AddGeom44[Add Geometry Attributes (6)]
    AddGeom44 --> usausufile90[usausufile90]
    usausufile90 --> Area43[AreaUsaSu]
    Area43 --> usausufile91[usausufile91
```

extrae el área de influencia. Ver figura 46. Dicha capa raster se convierte a polígono, se disuelven los campos en común y se agrega la geometría de área, para obtener los valores del área de cada grado de susceptibilidad. Ver figura 47.

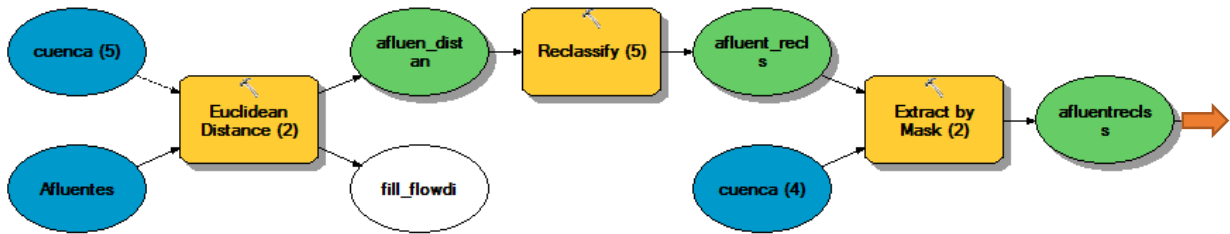


Figura 45 Esquema 8 del Modelo 2

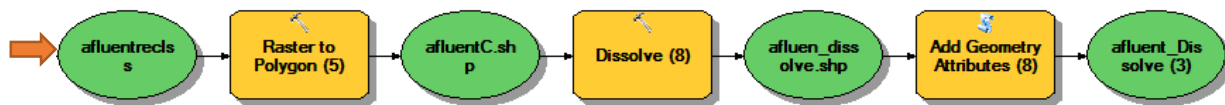


Figura 46 Esquema 9 del Modelo 2

Determinación de la susceptibilidad:

Finalmente, con las capas reclasificadas de acuerdo al grado de susceptibilidad de los usos de suelo, la pendiente, la litología, los afluentes y las estructuras, se realiza la superposición ponderada con *Weighted Overlay* otorgando los pesos de cada capa o variable de acuerdo a los resultados obtenidos en la matriz de jerarquización, presentados en la tabla 22. El resultado raster representa la susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa. Dicha capa es convertida a formato shapefile mediante *Raster To Polygon*. Posteriormente se disuelven los campos en común y se añade la geometría de área, para obtener el valor de las áreas de cada grado de susceptibilidad en la subcuenca. Ver figura 48.

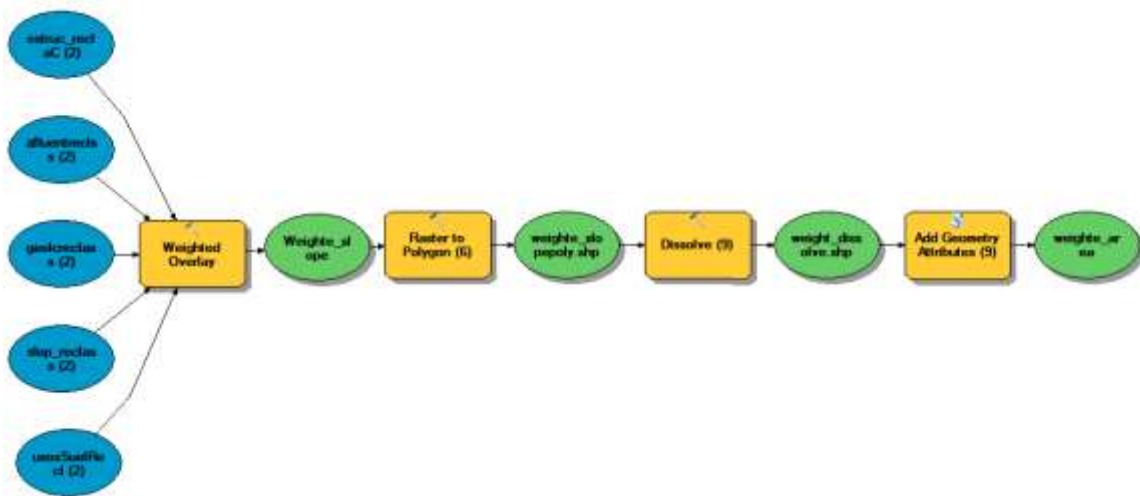
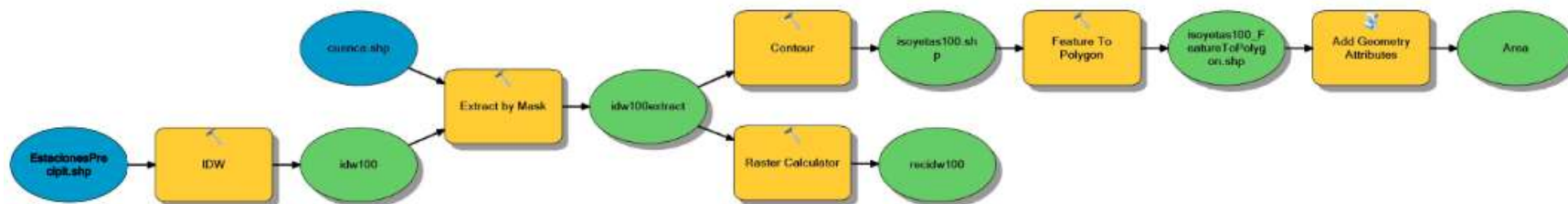


Figura 47 Esquema 10 del Modelo 2

Anexo 17 Modelo 3



Objetivo:

Este modelo se realiza para calcular las precipitaciones máximas en 24 horas para un período de retorno de 100 años en la subcuenca.

Entradas:

- EstacionesPrecipit: Es el archivo excel que contiene las coordenadas XY de las estaciones meteorológicas que influyen en la zona objeto de estudio y los correspondientes valores de precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno en 100 años. (los valores de precipitación se obtienen del análisis de precipitaciones sección 4.6, tablas 30,31 y 32 de intensidad de precipitación por duración de lluvia)
- Cuenca: cuenca en formato shapefile, obtenido a partir del Modelo 1.

Teniendo las estaciones meteorológicas, se aplica la herramienta *IDW* para interpolar la superficie de la zona de estudio a partir de dichos puntos o estaciones, luego con *Extract by Mask* se obtiene la interpolación ajustada a la geometría de la cuenca, y con *Raster Calculator* se escribe la expresión usando lenguaje Python para clasificar las precipitaciones de acuerdo al grado de susceptibilidad que representen. A su vez con el raster interpolado de la cuenca se aplica *Contour* para obtener las curvas de nivel o isoyetas asociadas a los valores de precipitación, luego con *Feature To Polygon* se convierte la geometría de tipo línea de dichas isoyetas a polígono y así, mediante *Add Geometry Attributes* determinar el área entre cada isoyeta; estos datos de área son usados para calcular la precipitación media de la cuenca. Ver figura 49.

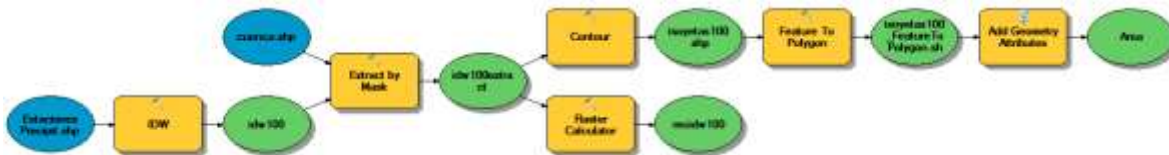


Figura 48 Esquema del Modelo 3

Anexo 18 Código HTML del visor web

A continuación, se presenta el código HTML del visor. La explicación de cada línea se encuentra como comentario dentro del mismo código entre `<!-- -->`

```
<!DOCTYPE html> <!-- Indica el tipo de documento en HTML5 -->
<html lang="es"> <!-- Elemento raíz HTML que envuelve al resto del código, el atributo lang define el idioma en este caso español -->
<head> <!-- Cabecera donde se define el título y se incorporan archivos externos de estilos y códigos javascript -->
    <meta charset="utf-8" /> <!-- Indica la codificación de caracteres utilizada-->
    <title>Visor Cuenca</title> <!-- Indica el título del documento-->
    <script src="http://cdn.leafletjs.com/leaflet-0.7/leaflet.js"></script> <!-- Script de Leaflet en versión 0.7 -->
    <link rel="stylesheet" href="http://cdn.leafletjs.com/leaflet-0.7/leaflet.css" /> <!-- Hoja de estilos de Leaflet en versión 0.7 -->
    <script src="http://maps.google.com/maps/api/js?v=3&sensor=false"></script> <!-- Script de Google -->
    <script src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AIzaSyCu1BWacQ51mKmU11jsrMFrKS8ZgdQobc"></script> <!-- API Key de Google -->
    <script src="Google.js"></script> <!-- API de Google obtenida del Plugin leaflet-plugins-1.9.3 -->

    <script src="Control.MiniMap.js"></script> <!-- Sript del plugin Leaflet-Minimap-master -->
    <link rel="stylesheet" href="Control.MiniMap.css" /> <!-- Hoja de estilos del plugin Leaflet-Minimap-master -->
    <script src="L.Control.MousePosition.js"></script> <!-- Script del plugin L.Control.MousePosition -->
    <link rel="stylesheet" href="L.Control.MousePosition.css" /> <!-- Hoja de estilos del plugin L.Control.MousePosition -->
    <!-- Script de códigos de las capas del visor en extensión .json -->

    <script type="text/javascript" src="slopepoly_dissolv.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="geolo_reclas_disolv.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="estrucco_Dissolve.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="usoSueloRecDiss.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="afluen_dissolve.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="weight_dissolve.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="geolC_disol.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="geol558h30_clip_dissolv.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="usoSueloDissolv.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="cuenca.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="line_netw600_Dissolve.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="linestrahler600_clip_dissolve.json"></script>
    <script type="text/javascript" src="isoyetas100_clip.json"></script>
```

```

<!-- Asignación de Estilos personalizados -->
<style>

#map {
width: 100%;
height: 600px;
}

button {
position: absolute;
top: 150px;
left: 50px;
z-index: 999;
}

</style>
</head>

<!-- Cuerpo con estilo de color de fondo azul -->
<body style="background-color:powderblue;">
  <!-- Etiquetas de encabezado de tamaño tamaño <h3> y <h4> -->
  <!-- <big> muestra el simbolo con un tamaño de fuente más grande -->
  <!-- <a> crea un enlace a otras páginas de internet, archivos o ubicaciones dentro de la misma página, direcciones de correo, o cualquier otra URL. -->
  <h3><a href=".."><big></big> Susceptibilidad</a></h3>
  <h4 style="text-align:center;font-family:verdana;color:white;"><b> Susceptibilidad por deslizamientos en la Subcuenca Arroyo de Quijorna</b> </h4>
  <!-- Se crea un elemento div con el nombre "map" para que contenga el mapa -->
  <div id="map"></div>
  <!-- El evento onclick se produce cuando el usuario hace clic en un elemento denominado Subcuenca -->
  <button onclick="onMyButtonClick()">Subcuenca</button>
</script>
<!-- L.map es la clase central de la API. Se usa para crear y manipular el mapa -->
<!-- En el mapa se establecen las coordenadas de la vista y un nivel de zoom. -->
  var map = L.map('map').
    setView([40.45627, -4.04434],
    9);

<!-- Capas base -->
  var osm = new L.TileLayer('http://(s).tile.openstreetmap.org/(s)/(x)/(y).png');

<!-- Variables de las capas de Google: SATELLITE, ROADMAP, HYBRID o TERRAIN -->
  var ggls = new L.Google('SATELLITE');
  var gglsr = new L.Google('ROADMAP');
  var gglsb = new L.Google('HYBRID');
  var gglt = new L.Google('TERRAIN');

<!-- Objetos para hacer el control de capas de Google -->
  var baseMaps = {
    "OpenStreetMap": osm,
    "Google Satellite": ggls,
    "Google Roadmap": gglsr,
    "Google Hybrid": gglsb,
    "Google Terrain": gglt,
  };

```

```

<!-- Variables JSON a usar: PENDIENTES, GEOLOGIA, ESTRUCTURAS,USOS DEL SUELO, DRENAJES -->
<!-- Con L.geoJson se importan al mapa las capas JSON que han sido llamadas como archivos externos en el script de la cabecera -->
<!-- Para la asignación del estilo, se crea una función y se usa el control Switch para asignar un color a cada clase de la capa -->

var pendientesreclass = L.geoJson(slopepoly_dissolv,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

var geolreclass = L.geoJson(geolo_reclas_dissolv,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

var EstructReclass = L.geoJson(estruc_Dissolve,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

var UsoSueloReclass = L.geoJson(usoSueloRecDiss,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

var AfluenteReclass = L.geoJson(afluen_dissolve,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

var weight = L.geoJson(weight_dissolve,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.GRIDCODE){
    case 1: return {color: "#0B3B0B",fillColor:"#0B3B0B", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#00FF00",fillColor:"#00FF00", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#FFFF00",fillColor:"#FFFF00", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
    case 5: return {color: "#FF0000",fillColor:"#FF0000", fillOpacity: 1};
  }
}});

```

Activar Windows

```

var geol = L.geoJson(geolC_disol,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.DLO){
    case '(COMOS DE DEYECCION). GRAVAS Y CANTOS POLIGENICOS, ARENAS Y' : return {color: "#F2F5A9", fillColor:"#F2F5A9", fillOpacity: 1};
    case '(DEPOSITOS DE CAUCES Y FONDOS DE VAGUADA). ARENAS, LIMO-ARCI' : return {color: "#0404B4", fillColor:"#0404B4", fillOpacity: 1};
    case '(LLANURA DE INUNDACION). GRAVAS Y CANTOS, ARENAS Y LIMO-ARCI' : return {color: "#216108", fillColor:"#216108", fillOpacity: 1};
    case '(TERRAZAS). GRAVAS Y CANTOS POLIGENICOS, ARENAS Y LIMOS' : return {color: "#31B404", fillColor:"#31B404", fillOpacity: 1};
    case 'ADAMELLITAS' : return {color: "#F781F3", fillColor:"#F781F3", fillOpacity: 1};
    case 'ARCOSAS' : return {color: "#FF008F", fillColor:"#FF008F", fillOpacity: 1};
    case 'ARCOSAS CON BLOQUES' : return {color: "#FAAC58", fillColor:"#FAAC58", fillOpacity: 1};
    case 'ARCOSAS Y FANGOS ARCOSICOS' : return {color: "#04B486", fillColor:"#04B486", fillOpacity: 1};
    case 'ARENAS Y GRAVAS. FANGOS VARIOLADOS' : return {color: "#2EFEC8", fillColor:"#2EFEC8", fillOpacity: 1};
    case 'ARENISCAS, MICROCONGLOMERADOS, CALIZAS, DOLOMITAS Y MARGAS' : return {color: "#A4A4A4", fillColor:"#A4A4A4", fillOpacity: 1};
    case 'DIQUES DE CUARZO", "POLY AREA' : return {color: "#086A87", fillColor:"#086A87", fillOpacity: 1};
    case 'DIQUES DE PORFIDO", "POLY AREA' : return {color: "#04B45F", fillColor:"#04B45F", fillOpacity: 1};
    case 'FM. ARENAS DE UTRILLAS. ARENAS CAOLINIFERAS, ARENAS' : return {color: "#CEECF5", fillColor:"#CEECF5", fillOpacity: 1};
    case 'GNEISES GLANDULARES' : return {color: "#ECCEF5", fillColor:"#ECCEF5", fillOpacity: 1};
    case 'LEUCOGRANITOS' : return {color: "#8904B1", fillColor:"#8904B1", fillOpacity: 1};
    case 'NIVEL SILICIFICADO' : return {color: "#BCA9F5", fillColor:"#BCA9F5", fillOpacity: 1};
    case 'PAPAGNEISES ESQUISTOSOS Y GNEISES BANDEADOS' : return {color: "#819FF7", fillColor:"#819FF7", fillOpacity: 1};
  }
});

var Estruc = L.geoJson(geol558h30_clip_dissolv,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.TIPO){
    case 'Cambio lateral de facies' : return {color: "#8A0808", fillColor:"#8A0808", fillOpacity: 1};
    case 'Contacto concordante' : return {color: "#61380B", fillColor:"#61380B", fillOpacity: 1};
    case 'Contacto discordante' : return {color: "#04B431", fillColor:"#04B431", fillOpacity: 1};
    case 'Contacto entre Cuaternarios' : return {color: "#DF01D7", fillColor:"#DF01D7", fillOpacity: 1};
    case 'Contacto mecánicoS' : return {color: "#FFB700", fillColor:"#FFB700", fillOpacity: 1};
    case 'Falla conocida' : return {color: "#8904B1", fillColor:"#8904B1", fillOpacity: 1};
    case 'Falla inversa' : return {color: "#B43104", fillColor:"#B43104", fillOpacity: 1};
    case 'Falla inversa' : return {color: "#610B21", fillColor:"#610B21", fillOpacity: 1};
    case 'Falla supuesta' : return {color: "#151515", fillColor:"#151515", fillOpacity: 1};
  }
});

var UsoSuelo = L.geoJson(usoSueloDissolv,{style: function(feature){
  switch (feature.properties.CODE_12){
    case '112': return {color: "#8904B1", fillColor:"#8904B1", fillOpacity: 1};
    case '211': return {color: "#088A08", fillColor:"#088A08", fillOpacity: 1};
    case '231': return {color: "#58ACFA", fillColor:"#58ACFA", fillOpacity: 1};
    case '244': return {color: "#FE2EC8", fillColor:"#FE2EC8", fillOpacity: 1};
    case '311': return {color: "#B40431", fillColor:"#B40431", fillOpacity: 1};
    case '321': return {color: "#F2F5A9", fillColor:"#F2F5A9", fillOpacity: 1};
    case '323': return {color: "#CEF6E3", fillColor:"#CEF6E3", fillOpacity: 1};
    case '324': return {color: "#AEB404", fillColor:"#AEB404", fillOpacity: 1};
  }
});

```



```

var Subcuenca = L.geoJson(cuenca, {style: function(feature){
return {
    fillColor: '#0B3B0B',
    weight: 2,
    opacity: 1,
    color: 'black',
    dashArray: '3',
    fillOpacity: 0.2
}}
}).addTo(map);

var Red_Drenaje = L.geoJson(line_netw600_Dissolve, {style: function(feature){
return {
    fillColor: '#000000',
    weight: 2,
    opacity: 1,
    color: 'blue',
    dashArray: '3',
    fillOpacity: 1
}}
}).addTo(map);

var OrdenDrenaje = L.geoJson(linestrahler600_clip_dissolve, {style: function(feature){
switch (feature.properties.GRID_CODE){
    case 1: return {color: "#2E64FE", fillColor: "#2E64FE", fillOpacity: 1};
    case 2: return {color: "#FF00BF", fillColor: "#FF00BF", fillOpacity: 1};
    case 3: return {color: "#F2F5A9", fillColor: "#F2F5A9", fillOpacity: 1};
    case 4: return {color: "#151515", fillColor: "#151515", fillOpacity: 1};
}
});

var Isoyetas100 = L.geoJson(isoyetas100_clip, {style: function(feature){
switch (feature.properties.ID){
    case 3: return {color: "#ff0000", fillColor: "#ff0000", fillOpacity: 1};
    case 6: return {color: "#00ff00", fillColor: "#00ff00", fillOpacity: 1};
}
});

<!-- Creación de la variable overlayMaps que contenga todas las variables de los JSON -->
var overlayMaps = {

    "Pendientes Reclasificado": pendientesreclass,
    "Litológico Reclasificado": geolreclass,
    "Estructuras Reclasificado": EstrucReclass,
    "Usos Suelo Reclasificado": UsoSueloReclass,
    "Influencia del drenaje Reclasificado": AfluenteReclass,
    "Susceptibilidad a movimientos en masa": weight,
    "Litología subcuenca": geol,
    "Estructuras subcuenca": Estruc,
    "Usos Suelo subcuenca": UsoSuelo,
    "SubCuenca Arroyo Quijorna": Subcuenca,
    "Red de Drenaje": Red_Drenaje,
    "Jerarquía Red de Drenaje": OrdenDrenaje,
    "Isoyetas": Isoyetas100,

};

<!-- Adición de capas de Google al inicializar el mapa -->
map.addLayer(ggls, gglsr, ggls, ggls);

<!-- Creación del control de capas y adición al mapa -->
L.control.layers(baseMaps, overlayMaps).addTo(map);

```

```

<!-- Se incluyen las leyendas en formato .jpg al mapa-->
var legend_pendientes_reclass = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_pendientes_reclass.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ "leyenda_pendientes_reclass.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_litologia = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_litologia.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_litologia.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_litologia_reclass = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_litologia_reclass.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_litologia_reclass.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_estructuras = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_estructuras.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_estructuras.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};
var legend_estructuras_reclass = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_estructuras_reclass.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_estructuras_reclass.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_usoSuelo = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_usoSuelo.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_usoSuelo.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_usoSuelo_reclass = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_usoSuelo_reclass.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_usoSuelo_reclass.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

```

```

var legend_red_Drenaje = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_red_Drenaje.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_red_Drenaje.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_ordenDrenaje = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_ordenDrenaje.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_ordenDrenaje.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_red_drenaje_reclass = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_red_drenaje_reclass.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_red_drenaje_reclass.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legendWeight = L.control({position: 'bottomleft'});
legendWeight.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyendaWeight.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_isoyetas = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_isoyetas.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_isoyetas.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};

var legend_cuenca = L.control({position: 'bottomleft'});
legend_cuenca.onAdd = function (mapa) {
var div = L.DomUtil.create('div', 'info legend');
div.innerHTML += "<iframe src='"+ " leyenda_cuenca.png " +"' width='200' height='90' frameborder='0'></iframe>"
return div;
};
legend_cuenca.addTo(map);

```

Activar Windows

```

<!-- El evento overlayadd se dispara o acciona cuando se selecciona a través del control de capas-->
map.on('overlayadd', function (eventLayer) {

    switch (eventLayer.name) {
        case 'Pendientes Reclasificado':
            legend_pendientes_reclass.addTo(this);
            break;

        case 'Litologico Reclasificado':
            legend_litologia_reclass.addTo(this);
            break;

        case 'Estructuras Reclasificado':
            legend_estructuras_reclass.addTo(this);

            break;

        case 'Usos Suelo Reclasificado':
            legend_usoSuelo_reclass.addTo(this);
            break;

        case 'Influencia del drenaje Reclasificado':
            legend_red_drenaje_reclass.addTo(this);
            break;

        case 'Susceptibilidad a movimientos en masa':
            legendWeight.addTo(this);
            break;

        case 'Litologia subcuenca':
            legend_litologia.addTo(this);
            break;
        case 'Estructuras subcuenca':
            legend_estructuras.addTo(this);
            break;

        case 'Usos Suelo subcuenca':
            legend_usoSuelo.addTo(this);
            break;

        case 'SubCuenca Arroyo Quijorna':
            legend_cuenca.addTo(this);
            break;

        case 'Red de Drenaje':
            legend_red_Drenaje.addTo(this);
            break;
    }
});

```



```

        case 'Jerarquía Red de Drenaje':
            legend_ordenDrenaje.addTo(this);
            break;

        case 'Isoyetas':
            legend_isoyetas.addTo(this);
            break;
    }
    break;
    ))) ;
<!-- El evento overlayremove se activa cuando es desactivada a través del control de capa.http://leafletjs.com/reference-1.0.3.html-->
map.on('overlayremove', function (eventLayer) {

    switch (eventLayer.name){
        case 'Pendientes Reclasificado':
            this.removeControl(legend_pendientes_reclass);
            break;

        case 'Litologico Reclasificado':
            this.removeControl(legend_litologia_reclass);
            break;

        case 'Estructuras Reclasificado':
            this.removeControl(legend_estructuras_reclass);
            break;

        case 'Litología subcuenca':
            this.removeControl(legend_litologia);
            break;

        case 'Estructuras subcuenca':
            this.removeControl(legend_estructuras);
            break;

        case 'Usos Suelo subcuenca':
            this.removeControl(legend_usoSuelo);
            break;

        case 'SubCuenca Arroyo Quijorna':
            this.removeControl(legend_cuenca);
            break;

        case 'Red de Drenaje':
            this.removeControl(legend_red_Drenaje);
            break;
    }
});

```

```

        case 'Jerarquía Red de Drenaje':
            this.removeControl(legend_ordenDrenaje);
            break;

        case 'Isoyetas':
            this.removeControl(legend_isoyetas);
            break;

        case 'Influencia del drenaje Reclasificado':
            this.removeControl(legend_red_drenaje_reclass);
            break;

        case 'Usos Suelo Reclasificado':
            this.removeControl(legend_usoSuelo_reclass);
            break;

        case 'Susceptibilidad a movimientos en masa':
            this.removeControl(legendWeight);
            break;
    }
    break;
    ))) ;

<!-- Función Botón y bindPupup para mostrar el mensaje al activar el botón-->
function onMyButtonClick(){
    L.marker([40.44504, -4.04572], {draggable: true}).addTo(map)
    .bindPopup('Subcuenca <br> Arroyo de Quijorna <br> Angela Español')
    }

<!-- Se declara el objeto en el mapa. MousePosition es un control para mostrar coordenadas geográficas cuando se mueve el mouse sobre el mapa. -->
L.control.mousePosition().addTo(map);
<!-- Se declara el objeto en el mapa del control Minimap, el cual es un pequeño mapa en la esquina del visor web -->
var osmUrl='http://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png';
var osmAttrib='Map data &copy; OpenStreetMap contributors';
var osm2 = new L.TileLayer(osmUrl, {minZoom: 0, maxZoom: 13, attribution: osmAttrib});
var miniMap = new L.Control.MiniMap(osm2).addTo(map)
</script>
<!-- Pie de página -->
<footer style="text-align:center;font-family:verdana;color:gray"> Elaborado por: Angela Español </footer>
</body>
</html>

```